

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl<sup>7</sup>

H04B 10/12

G02B 6/00 G02F 1/35

## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 01137583.3

[43] 公开日 2002 年 5 月 29 日

[11] 公开号 CN 1351428A

[22] 申请日 2001. 10. 30 [21] 申请号 01137583.3

[30] 优先权

[32] 2000. 10. 30 [33] JP [31] 330966/2000

[71] 申请人 富士通株式会社

地址 日本神奈川

[72] 发明人 寺原隆文 雷纳·汉伯格  
星田刚司

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事  
务所

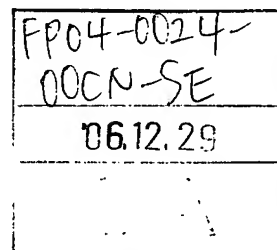
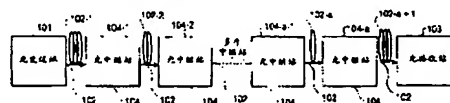
代理人 蒋世迅

权利要求书 8 页 说明书 33 页 附图页数 20 页

[54] 发明名称 分布光放大设备, 光通信站, 光通信系统和光缆

[57] 摘要

一种光纤传输线路, 包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤, 使通过该传输线路传播的光, 先通过第一光纤, 然后通过第二光纤, 最后通过第三光纤传播。第一、第二和第三光纤分别有第一、第二和第三特征值。第二特征值大于第一特征值和第三特征值。各光纤的特征值是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。向该传输线路提供泵浦光, 使光信号通过该传输线路传播时, 在传输线路内产生 Raman 放大。



知识产权出版社出版

BEST AVAILABLE COPY

ISSN 1008-4274



## 权 利 要 求 书

---

1. 一种分布光放大设备, 包括:

光纤, 具有一个中部区, 该中部区的特征值大于中部区以外的区的特征值, 相应的区的特征值是光纤在该相应区的非线性折射率除以光纤在该相应区的有效截面; 和

泵浦光源, 向该光纤提供泵浦光。

2. 按照权利要求 1 的分布光放大设备, 其中具有中部区的光纤的一部分, 通过模变换拼接, 与具有中部区以外的区的光纤的相邻部分连接。

3. 一种分布光放大设备, 包括:

一个光纤线, 包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤, 使通过该光纤线传播的光, 先通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤, 第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值, 第二特征值大于第一和第三特征值, 各光纤的特征值是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面; 和

泵浦光源, 向该光纤线提供泵浦光。

4. 按照权利要求 3 的分布光放大设备, 其中的第一和第三特征值几乎相等。

5. 按照权利要求 3 的分布光放大设备, 其中第一光纤的波长色散乘以第二光纤的波长色散的乘积, 在通过该光纤线传输的光信号的波段上是负的, 且第三光纤的波长色散几乎等于第一光纤的波长色散。

6. 按照权利要求 5 的分布光放大设备, 其中, 在通过该光纤线传输的光信号的波长上, 在该光纤线的输出端, 累积波长色散几乎为零。

7. 按照权利要求 3 的分布光放大设备, 其中第一光纤的波长色散斜率乘以第二光纤的波长色散斜率的乘积, 在通过该光纤线传输的光信号的波段上是负的, 且第三光纤的波长色散斜率几乎等于第一光纤的波长色散斜率。

8. 按照权利要求 7 的分布光放大设备, 其中, 在通过该光纤线传

输的光信号的波长上，累积波长色散斜率与距离的关系成直线形状。

9. 按照权利要求 7 的分布光放大设备，其中，在通过该光纤线传输的光信号的波长上，在该光纤线的输出端，累积波长色散几乎为零。

10. 按照权利要求 3 的分布光放大设备，其中第一和第三光纤的长度几乎相同。

11. 按照权利要求 3 的分布光放大设备，其中第一光纤长度及第三光纤长度之和与第二光纤长度的比值，在约 1:1 至约 2:1 的范围。

12. 按照权利要求 3 的分布光放大设备，其中光纤线的长度为 50 km 或更长。

13. 按照权利要求 3 的分布光放大设备，其中 Raman 开/关增益相对于光纤线的总损耗的相对增益约为 0.5 至 1。

14. 一种分布光放大设备，包括：

一个光纤线，包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过该光纤线传播的光，先通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤，和

向该光纤线提供泵浦光的泵浦光源，其中

第一光纤的波长色散系数  $D1$  除以其波长色散斜率  $S1$  的值  $D1/S1$ ，几乎等于第二光纤的波长色散系数  $D2$  除以其波长色散斜率  $S2$  的值  $D2/S2$ ，和

第一光纤的波长色散系数  $D1$  乘以其长度  $L1$  的值  $D1 \cdot L1$ ，与第二光纤的波长色散系数  $D2$  乘以其长度  $L2$  的值之和，几乎为零，

第三光纤的波长色散系数、波长色散斜率、和长度几乎等于第一光纤的波长色散系数  $D1$ 、波长色散斜率  $S1$ 、和长度  $L1$ ，

在通过该光纤线传输的光信号的波长上，在该光纤线的输出端，累积波长色散几乎为零，和

在通过该光纤线传输的光信号的波长上，在该光纤线的输出端，累积波长色散斜率几乎为零。

15. 一种光通信站，包括：

对光信号执行预定处理的处理装置；

与所述处理装置连接的光纤线，包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过该光纤线传播的光，先通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤，第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值，第二特征值大于第一和第三特征值，各光纤的特征值是該光纤的非线性折射率除以該光纤的有效截面；和

向該光纤线提供泵浦光的泵浦光源。

16. 按照权利要求 15 的光通信站，其中所述处理装置是接收光信号的接收装置。

17. 按照权利要求 15 的光通信站，其中所述处理装置是放大光信号的中继/放大装置。

18. 按照权利要求 15 的光通信站，其中所述处理装置是分/插装置，用于从/向波分复用光信号中分出和/或插入预定波长的光信号，該波分复用光信号是把彼此不同波长的多个光信号波长复用而成。

19. 一种光通信系统，包括：

光传输线路；

第一和第二站，用該光传输线路连接在一起，并对通过该传输线路传送的光信号执行预定的处理，和

向該光传输线路提供泵浦光的泵浦光源，

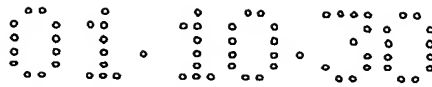
其中，该传输线路包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过该传输线路传播的光信号，通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤传播，第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值，第二特征值大于第一和第三特征值，各光纤的特征值是該光纤的非线性折射率除以該光纤的有效截面。

20. 一种光通信系统，包括：

第一和第二传输线路，各自有第一和第二端；

光发送站，用于产生光信号并把产生的光信号送至第一传输线路的第一端，使該光信号通过第一传输线路传播至第一传输线路的第二端；

光中继站，从第一传输线路的第二端接收光信号，放大该接收的



光接收站，从第二传输线路的第二端接收放大的光信号，其中至少第一和第二传输线路之一包括

连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过各传输线路传播的光信号，通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤传播，第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值，第二特征值大于第一和第三特征值，相应的光纤的特征值是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面，在相应的传输线路设置泵浦光源。

21. 按照权利要求 20 的光通信系统, 其中的光中继站包括分/插装置, 用于从/向波分复用光信号中分出和/或插入预定的光信号, 该波分复用光信号是把彼此不同波长的多个光信号波长复用而成。

22. 一种设备, 包括:

光缆，包括多根光纤，每根光纤在中部区的特征值，大于该光纤中部区以外的区的特征值，相应区的特征值是光纤在该区的非线性折射率除以光纤在该区的有效截面。

23. 一种设备, 包括:

光缆，包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过该光缆传播的光，通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤传播，第二光纤有负的色散值，第一和第三光纤各有正的色散值，该光缆光学上把两个光中继站或一个光中继站与一个终端站连接起来。

24. 按照权利要求 23 的设备, 其中第一和第三光纤各在  $1.3\mu\text{m}$  波段中有零色散值。

25. 一种光通信系统, 包括:

光缆，包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过该光缆传播的光，通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤传播，第二光纤有负的色散值，第一和第三光纤各有正的色散值，该光缆光学上把两个光中继站连接起来，该两个光中继站之一向该光缆提供泵浦光，使光缆中产生分布 Raman 放大，或者该光缆光学上把一个光中

继站与一个终端站连接起来，使该光中继站和该终端站之一向该光缆提供泵浦光，以便在光缆中产生分布 Raman 放大。

26. 按照权利要求 25 的光通信系统，其中第一和第三光纤各在  $1.3\mu\text{m}$  波段中有零色散值。

27. 一种设备，包括：

一个传输线路，该传输线路从传输线路的输入端到输出端，包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，于是，信号光的传播通过该输入端，然后通过第一光纤、然后通过第二光纤、然后通过第三光纤、最后通过该输出端，第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值，第二特征值大于第一特征值和第三特征值，各光纤的特征值是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面，和

泵浦光源，向该传输线路提供泵浦光，使信号光通过该传输线路传播时被 Raman 放大所放大。

28. 按照权利要求 27 的设备，其中第一和第三特征值几乎相等。

29. 按照权利要求 27 的设备，其中第一光纤的波长色散乘以第二光纤的波长色散的乘积，在信号光的波段上是负的，且第三光纤的波长色散几乎等于第一光纤的波长色散。

30. 按照权利要求 29 的设备，其中，在信号光的波长上，在传输线路的输出端，累积波长色散几乎为零。

31. 按照权利要求 27 的设备，其中，第一光纤的波长色散斜率乘以第二光纤的波长色散斜率的乘积，在信号光的波段上是负的，且第三光纤的波长色散斜率几乎等于第一光纤的波长色散斜率。

32. 按照权利要求 31 的设备，其中，在通过该传输线路传播的信号光波长上，累积波长色散斜率与距离的关系成直线形状。

33. 按照权利要求 31 的设备，其中，在信号光波长上，在传输线路的输出端，累积波长色散几乎为零。

34. 按照权利要求 27 的设备，其中第一光纤和第三光纤的长度几乎相同。

35. 按照权利要求 27 的设备，其中，第一光纤长度及第三光纤长

度之和对第二光纤长度的比值，在约 1:1 至约 2:1 的范围。

36. 按照权利要求 27 的设备，其中传输线路的长度为 50 km 或更长。

37. 按照权利要求 27 的设备，其中 Raman 开/关增益对该传输线路总损耗的相对增益约为 0.5 至 1。

38. 一种设备，包括：

一个传输线路，该传输线路从传输线路的输入端到输出端，包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，于是，信号光的传播通过该输入端，然后通过第一光纤、然后通过第二光纤、然后通过第三光纤、最后通过该输出端；和

泵浦光源，向该传输线路提供泵浦光，使信号光通过该传输线路传播时被 Raman 放大所放大，其中

第一光纤的波长色散系数  $D1$  除以其波长色散斜率  $S1$  的值  $D1/S1$ ，几乎等于第二光纤的波长色散系数  $D2$  除以其波长色散斜率  $S2$  的值  $D2/S2$ ，和

第一光纤的波长色散系数  $D1$  乘以其长度  $L1$  的值  $D1 \cdot L1$ ，与第二光纤的波长色散系数  $D2$  乘以其长度  $L2$  的值之和，几乎为零，

第三光纤的波长色散系数、波长色散斜率、和长度几乎等于第一光纤的波长色散系数  $D1$ 、波长色散斜率  $S1$ 、和长度  $L1$ ，

在信号光的波长上，在该传输线路的输出端，累积波长色散几乎为零，和

在信号光的波长上，在该传输线路的输出端，累积波长色散斜率几乎为零。

39. 一种光通信系统，包括：

光传输线路；

第一和第二站，用该光传输线路连接在一起，并对通过该传输线路传送的信号光执行预定的处理，和

向该光传输线路提供泵浦光的泵浦光源，使信号光通过该传输线路传播时被 Raman 放大所放大，

其中，该传输线路包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过该传输线路传播的信号光，通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤传播，第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值，第二特征值大于第一和第三特征值，各光纤的特征值是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。

40. 一种光通信系统，包括：

第一和第二传输线路，各自有第一和第二端；

光发送站，用于产生光信号并把产生的光信号送至第一传输线路的第一端，使该光信号通过第一传输线路传播至第一传输线路的第二端；

光中继站，从第一传输线路的第二端接收光信号，放大该接收的光信号，并把放大的光信号送至第二传输线路的第一端，使放大的光信号通过第二传输线路传播至第二传输线路的第二端；和

光接收站，从第二传输线路的第二端接收放大的光信号，其中至少第一和第二传输线路之一包括

连接在一起的第一、第二、和第三光纤，使通过各传输线路传播的光信号，通过第一光纤、然后通过第二光纤、最后通过第三光纤传播，第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值，第二特征值大于第一和第三特征值，各光纤的特征值是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面，向相应传输线路提供泵浦光，使光信号通过相应传输线路传播时，该光信号被 Raman 放大所放大。

41. 按照权利要求 40 的光通信系统，其中的光中继站包括分/插装置，用于从/向波分复用光信号中分出和/或插入预定的光信号，该波分复用光信号是把彼此不同波长的多个光信号波长复用而成。

42. 一种设备，包括：

一个传输线路，包括第一、第二、和第三光纤，第一光纤与第二光纤连接，而第二光纤与第三光纤连接，使通过该传输线路传播的信号光，通过第一光纤、然后通过第二光纤、然后通过第三光纤传播，第一、第二、和第三光纤分别有第一、第二、和第三特征值，第二特征值大于



01.10.30

第一和第三特征值，各光纤的特征值是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面，和

泵浦光源，向该传输线路提供泵浦光，使信号光通过至少第一、第二、和第三光纤之一传播时被 Raman 放大所放大。

## 说 明 书

---

分布光放大设备, 光通信站, 光通信系统, 和光缆

### 交叉参考相关申请

本申请要求的优先权为日本申请 No. 2000-330966, 2000 年 10 月 30 申请, 合并于此供参考。

### 技术领域

本发明涉及既能用作光传输线路路又能用作光放大介质的分布光放大设备, 更具体说, 是涉及能补偿传输损耗、防止非线性光学效应、和改善光信噪比的分布光放大设备。此外, 本发明还涉及适用于该分布光放大设备的光缆、包含该分布光放大设备的光通信站、和包含该分布光放大设备的光通信系统。

### 背景技术

未来的多媒体网络将使用光通信系统, 随着光通信技术的进展, 未来多媒体网络要求的高带宽、高容量、超长距离传输都有可能实现。波分复用(以下简称'WDM')是为此目的而发展的重要光通信技术, 因为 WDM 有效地利用了光纤的宽带特性和巨大的容量。

更详细地说, 在 WDM 光通信系统中, 不同波长的多个光信号被复用在一起, 成为一个 WDM 光信号。然后, 通过作为光传输线路路的单根光纤发送 WDM 光信号。WDM 光通信系统能提供极高带宽、极高容量、极远距离的传输。

在远距离光通信系统中, 由于 WDM 光信号经光传输线路路传输而衰减, 所以在传输某段距离之后, 必须把 WDM 光信号放大。为此, 放大 WDM 光信号的光放大设备是经常要使用的, 所以一直存在对该种设备的深一层研究和开发。

因此, 在常规的 WDM 光通信系统中, 光发送站使用波分复用把多个不同波长的光信号复用在一起, 成为一个 WDM 光信号。然后通过光传输线路路发送该 WDM 光信号。光接收站从光传输线路路接收发送的 WDM 光信号。沿光传输线路路设置一个或多个光中继站, 用以放大 WDM 光信

号。光中继站的数目，通常由提供足够放大量的系统设计参数确定。

在通过光传输线路传输的同时，WDM 光信号的波形还因波长色散、传输损耗、和非线性光学效应而恶化。因此已经发明了多种应对措施。

例如，为提供波长色散补偿，已经发明多种常规方法。在一种方法中，把彼此具有不同波长色散的光纤组合成一色散受控光纤（以下简称‘DMF’）。

图 1A 和 1B 示意画出常规的色散受控光纤的结构。

更详细说，图 1A 画出光通信系统中两个站间的部分结构，其中光中继站 1004-A 和光中继站 1004-B 由光传输线路 1002 连接。光传输线路 1002 包括波长色散为正的光传输线路 1002-L1 和波长色散为负的光传输线路 1002-L2。从光中继站 1004-A 发送的光信号，经光传输线路 1002-L1 和光传输线路 1002-L2，到达光中继站 1004-B。光信号传输时，在光传输线路 1002-L1 中经受正的波长色散，又在光传输线路 1002-L2 中经受负的波长色散，以此方式进行补偿，使累积的波长色散几乎变为零。上述 DMF 已在例如美国专利 No.5,191,631 和日本专利 Laid-open No. Hei 9-318824 公开。把波长色散做成对称的一种对称的 DMF，也已公开。

图 1B 画出光通信系统中两个站间的部分结构。光中继站 1004-C 和光中继站 1004-D 由光传输线路 1002 连接。光传输线路 1002 包括波长色散为正的光传输线路 1002-L3、波长色散为负的光传输线路 1002-L4、和波长色散为正的光传输线路 1002-L5。从光中继站 1004-C 发送的光信号，在光传输线路 1002-L3 中经受正的波长色散，在光传输线路 1002-L4 中经受负的波长色散，再在光传输线路 1002-L5 中经受正的波长色散。于是，以此方式来补偿发送至光中继站 1004-D 的光信号，使累积的波长色散几乎变为零。同时，从光中继站 1004-D 发送的光信号，在光传输线路 1002-L5 中经受正的波长色散，在光传输线路 1002-L4 中经受负的波长色散，再在光传输线路 1002-L3 中经受正的波长色散。于是，以此方式来补偿发送至光中继站 1004-C 的光信号，使累积的波长色散几乎变为零。该 DMF 公开在例如美国专利 No.5,778,128、论文“Enhanced power solitons in optical fibers with periodic dispersion management”

( N.J.Smith, F.M. Knox, N.J. Doran, K.J. Blow and I. Bennion: Electronics Letters, Vol. 31, No.1, p54-p55, 4th Jan. 1996 )、论文 “ Energy-scaling characteristics of solitons in strongly dispersion-managed fibers ” ( N.J. Smith, N.J. Doran, F.M. Knox, and W. Forysak: Optics Letters, Vol. 21, No. 24, p1981-p1983, 15th Dec. 1996 )、和论文 “ 40 Gbit/s $\times$ 16 WDM transmission over 2000 km using dispersion managed low-nonlinear fiber span ” ( Itsuro Morita, Keiji Tanata, Noburu Edagawa and Masatoshi Suzuki: ECOC 2000, Vol. 4, p25-p26, 2000 ) 中。

上述常规技术的发明，是基于波长色散补偿的观点。该种技术的发明，没有考虑到在一个系统中，光传输线路也能作为分布光放大的光放大介质。

同时，补偿传输损耗的各种方法照例也已经发明了，其中一种是分布光放大设备，特别是分布 Raman 光放大器。

图 2A 和 2B 示意画出常规的损耗补偿/分布 Raman 光放大器。

图 2A 画出上述光通信系统中两个站间的部分结构，其中光中继站 1004-A 和光中继站 1004-E 由光传输线路 1002 连接。在光中继站 1004-E 内设有泵浦光源 1005-E，为 Raman 放大提供泵浦光。光传输线路 1002 包括具有大的有效截面的光传输线路 1002-L6 和比光传输线路 1002-L6 有较小有效截面的光传输线路 1002-L7，且由泵浦光源 1005-E 向光传输线路 1002 提供泵浦光。光信号从光中继站 1004-A，经光传输线路 1002-L6 和光传输线路 1002-L7，发送至光中继站 1004-E，并被光传输线路 1002 中的泵浦光实施 Raman 放大，所以光信号在传输的同时，还以此方式进行补偿，使传输损耗几乎变为零。换言之，光信号经 Raman 放大，使光中继站 1004-A 的输出光电平与光中继站 1004-E 的输入光电平，基本上彼此相等。有效截面是光传输线路截面的一部分，光信号与泵浦光在有效截面中相互作用，以产生足够的 Raman 放大。该 DMF 公开在例如论文 “ 40 Gbit/s $\times$ 8 NZR WDM transmission experiment over 80 km $\times$ 5-span using distributed Raman amplification in RDF ” ( R. Ohhira, Y. Yano, A. Noda, Y. Suzuki, C. Kurioka, M. Tachigori, S. Moribayashi,

K. Fukuchi, T. Ono and T. Suzuki: ECOC '99, 26-30, p176-p177, Sep. 1999, Nice, France) 中。

这里有效截面的大小与非线性光学效应的大小有关。当有效截面大时，非线性光学效应则小。相反，当有效截面小时，非线性光学效应则大。因此，从选择的观点看，是选择增加送出光信号的光中继站 1004-A 中的光功率，还是选择增加提供泵浦光的光中继站 1004-E 中的光功率，图 2B 所示结构都是可行的。在图 2B 中，光传输线路 1002 包括具有小有效截面的光传输线路 1002-LS 和比光传输线路 1002-LS 有较大有效截面的光传输线路 1002-L9。光传输线路 1002-LS 与光中继站 1004-A 连接。该种结构公开在例如论文“A proposal of a transmission line without any loss in a longitudinal direction utilizing distributed Raman amplification” (Toshiaki Okuno, Tetsufumi Tsuzaki and Masayuki Nishimura: B-10-116, the 2000 Society Conference of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) 中。

图 2A 和 2B 所示常规技术，是基于补偿损耗的观点而发明的技术，没有考虑波长色散的补偿、光的信噪比（以下简称‘光 SNR’）等等。

此外，在图 1A 和 1B 与图 2A 和 2B 的常规技术中，没有考虑非线性光学效应，特别是非线性相移。

值得注意的是波长色散与有效截面的相关性，即波长色散为正的光纤，常常具有小的有效截面，而波长色散为负的光纤，常常具有大的有效截面。

在以较少误码率实现光信号远距离传输时，存在波长色散、传输损耗、和非线性光学效应等问题，需要相当均衡地作为一个整体进行补偿，而不是只补偿一个物理量。

### 发明内容

本发明的一个目的，是提供一种光放大介质并解决上述各种问题，该光放大介质要有适当特性来提供分布光放大。本发明还有一个目的，是提供使用该光放大介质的分布光放大设备、光缆、光通信站、和光通信系统。

本发明另外的目的和优点，将部分地在下面的说明中展示，而且部分地可以从该说明中明显看出，或可以从本发明的实施中了解。

本发明的各个目的，是借助提供一种分布光放大设备达到的，该设备包括具有中部区(middle field)的一种光纤，该中部区的特征值大于中部区以外的区的特征值，相应区的特征值，是该光纤在该相应区的非线性折射率除以该光纤在该相应区的有效截面。该设备还包括向该光纤提供泵浦光的泵浦光源。

本发明的各个目的，还借助提供一种分布光放大设备达到，该设备包括一种光纤线(fiber line)和向该光纤线提供泵浦光的泵浦光源。该光纤线包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，使通过该光纤线传播的光，先通过第一光纤，然后通过第二光纤然后再通过第三光纤。该第一、第二和第三光纤各有第一、第二和第三特征值。第二特征值大于第一特征值和第三特征值。相应光纤的特征值，是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。

本发明的各个目的，还进一步借助提供一种分布光放大设备达到，该设备包括(a)把第一、第二和第三光纤连接在一起而成的光纤线，使通过光纤线传播的光，传播时通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后再通过第三光纤，以及(b)向该光纤线提供泵浦光的泵浦光源。第一光纤的波长色散系数  $D1$  除以其波长色散斜率  $S1$  的值  $D1/S1$ ，几乎等于第二光纤的波长色散系数  $D2$  除以其波长色散斜率  $S2$  的值  $D2/S2$ 。第一光纤的波长色散系数  $D1$  乘以其长度  $L1$  的值  $D1 \cdot L1$ ，与第二光纤的波长色散系数  $D2$  乘以其长度  $L2$  的值之和，几乎为零。第三光纤的波长色散系数、波长色散斜率、和长度，几乎等于第一光纤的波长色散系数  $D1$ 、波长色散斜率  $S1$ 、和长度  $L1$ 。通过光纤线传输的光信号，在某个波长上的累积波长色散，在光纤线的输出上几乎为零。在通过该光纤线传输的光信号波长上，累积波长色散斜率在该光纤线的输出上几乎为零。

本发明的各个目的，还借助提供一种光通信站达到，该站包括对光信号执行预定处理的处理装置，和与该处理装置连接的光纤线。该光纤线

包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，使通过光纤线传播的光，通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后再通过第三光纤。第一、第二和第三光纤各有第一、第二和第三特征值。第二特征值大于第一特征值和第三特征值。相应光纤的特征值，是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。一泵浦光源向该光纤线提供泵浦光。

本发明的各个目的，还进一步借助提供一种光通信系统达到，该系统包括 (a) 一种光传输线路，(b) 第一和第二站，用该光传输线路连接在一起，并对通过该光传输线路传输的光信号执行预定的处理，以及 (c) 泵浦光源，向该传输线路提供泵浦光。该传输线路包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，使通过该传输线路传播的光信号，通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后再通过第三光纤。第一、第二和第三光纤各有第一、第二和第三特征值。第二特征值大于第一和第三特征值。相应光纤的特征值，是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。

还有，本发明的各个目的，是借助提供一种光通信系统达到的，该系统包括 (a) 第一和第二传输线路，各自有第一和第二端，(b) 光发送站，用于产生光信号并把产生的光信号送至第一传输线路的第一端，使该光信号通过第一传输线路到达第一传输线路的第二端，(c) 光中继站，从第一传输线路的第二端接收光信号、放大接收的光信号、并把放大的光信号送至第二传输线路的第一端，使放大的光信号通过第二传输线路传播至第二传输线路的第二端，以及 (d) 光接收站，从第二光传输线路的第二端接收放大的光信号。至少第一和第二传输线路之一包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，使通过相应传输线路传播的光信号，通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后再通过第三光纤传播。第一、第二和第三光纤各有第一、第二和第三特征值，第二特征值大于第一和第三特征值。相应光纤的特征值，是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。该相应的传输线路设有泵浦光源。

本发明的各个目的，是借助提供一种光缆达到的，该光缆包括多根光纤。每根光纤在中部区的特征值大于该光纤中部区以外的区的特征值，相应的区的特征值，是该光纤在该区的非线性折射率除以该光纤在该区



的有效截面。

本发明的各个目的，还借助提供一种光缆达到，该光缆包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，使通过该光缆传播的光，通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后再通过第三光纤传播。第二光纤有负的色散值。第一和第三光纤各有正的色散值。该光缆在光学上把两个光中继站连接起来，或把一个光中继站与一个终端站连接起来。

还有，本发明的各个目的，是借助提供一种光通信系统达到的，该系统包括由连接在一起的第一、第二和第三光纤组成的光缆，使通过该光缆传播的光，通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后再通过第三光纤传播。第二光纤有负的色散值。第一和第三光纤各有正的色散值。该光缆在光学上把 (a) 两个光中继站连接起来，其中一个光中继站向该光缆提供泵浦光，使该光缆产生分布 Raman 放大，或把 (b) 一个光中继站与一个终端站连接起来，该光中继站与终端站之一，向该光缆提供泵浦光，使该光缆产生分布 Raman 放大。

此外，本发明的各个目的，是借助提供一种设备达到的，该设备包括一传输线路和一泵浦光源。该传输线路从传输线路的输入端到输出端，包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，使信号光的传播通过该输入端，然后通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后通过第三光纤，最后通过输出端。第一、第二和第三光纤各有第一、第二和第三特征值。第二特征值大于第一特征值和第三特征值。相应光纤的特征值，是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。该泵浦光源向传输线路提供泵浦光，使信号光通过传输线路传播时被 Raman 放大。

再有，本发明的各个目的，是借助提供一种设备达到的，该设备包括一传输线路和一泵浦光源。该传输线路从传输线路的输入端到输出端，包括连接在一起的第一、第二和第三光纤，使信号光的传播通过该输入端，然后通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后通过第三光纤，最后通过该输出端。该泵浦光源向传输线路提供泵浦光，使信号光通过传输线路传播时被 Raman 放大。该第一光纤的波长色散系数  $D1$  除以其波长色散斜率  $S1$  的值  $D1/S1$ ，几乎等于第二光纤的波长色散系数  $D2$  除以其





**Raman 放大.**

本发明的各个目的，还进一步借助提供一种设备达到，该设备包括由第一、第二和第三光纤构成的传输线路，第一光纤与第二光纤连接，而第二光纤与第三光纤连接，使通过传输线路传播的信号光，通过第一光纤，然后通过第二光纤，然后再通过第三光纤传播。第一、第二和第三光纤各有第一、第二和第三特征值，第二特征值大于第一特征值和第三特征值。相应光纤的特征值，是该光纤的非线性折射率除以该光纤的有效截面。该设备还包括向该传输线路提供泵浦光的泵浦光源，使信号光通过至少第一、第二和第三光纤之一传播时，该光信号被 Raman 放大。

#### 附图说明

从下述结合附图的优选实施例，本发明的上述和其他目的以及优点，将变得明显和更易理解，附图有：

图 1A 和 1B 是示意图，画出常规的波长色散受控光传输线路的结构；

图 2A 和 2B 是示意图，画出常规的损耗补偿/分布 Raman 放大器的结构；

图 3 是示意图，按照本发明的一个实施例，画出一种光通信系统的结构；

图 4A、4B 和 4C 按照本发明的一个实施例，示意画出全受控/分布 Raman 放大器的结构，以及光功率与累积波长色散的曲线；

图 5A、5B、5C 和 5D 按照本发明的一个实施例，对每种传输线路结构画出光功率与传输距离的相互关系曲线；

图 6 是曲线图，按照本发明的一个实施例，表明当实施 Raman 放大，使该光传输线路的输入信号功率和光传输线路的输出信号功率彼此相等时，光传输线路中信号光功率（各信道的平均值）的状态；

图 7 是曲线图，按照本发明的一个实施例，表明泵浦光功率与 Raman 开/关增益的相互关系；

图 8 是曲线图，按照本发明的一个实施例，表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系；

图 9 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 表明相移与 Raman 开/关增益的相互关系;

图 10A 和 10B 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系;

图 11 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 表明光 SNR 与泵浦光功率的相互关系以及相移与 Raman 开/关增益的相互关系;

图 12 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 画出各种光传输线路结构的眼图;

图 13A 和 13B 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系;

图 14A 和 14B 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系 (长度比: 约 0.5, 传输线路长度: 分别为 100 km、50 km);

图 15A 和 15B 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系 (长度比: 约 1, 传输线路长度: 分别为 100 km、50 km);

图 16 是曲线图, 按照本发明的一个实施例, 表明 (类型 2) 相对增益与光 SNR 的相互关系;

图 17 是示意图, 按照本发明的一个实施例, 画出光通信系统中一种光发送站的结构;

图 18 是示意图, 按照本发明的一个实施例, 画出光通信系统中一种光中继站的结构;

图 19 是示意图, 按照本发明的一个实施例, 画出光通信系统中一种光接收站的结构;

图 20A、20B 和 20C 是视图, 按照本发明的一个实施例, 画出模变换拼接(splicing)的若干例子;

图 21 是解释用曲线图, 按照本发明的一个实施例画出波长色散斜率; 和

图 22A 和 22B 是示意图, 按照本发明的一个实施例, 画出一种双

向光通信系统的结构。

### 具体实施方式

现在详细参照本发明各优选实施例，结合附图加以说明，其中，相同的参考数字自始至终表示相同的单元。

图 3 是示意图，按照本发明的一个实施例，画出一种光通信系统的结构。

图 4A、4B 和 4C 按照本发明的一个实施例，示意画出全受控/分布 Raman 放大器的结构，以及光功率与累积波长色散的曲线，还画出光通信系统中两个站之间的部分结构。

现在参看图 3 和图 4A、4B 及 4C，光通信系统包括光发送站 101，光发送站 101 产生由多个（例如“m”个）不同波长光信号复用起来的一个 WDM 光信号。产生的 WDM 光信号，通过光传输线路 102 发送至光接收站 103。光接收站 103 接收 WDM 光信号，并处理该接收的 WDM 光信号。光传输线路 102 接收由泵浦光源（图 3 上未画出，请见图 4A 中的泵浦光源 105-B）提供的泵浦光，使光传输线路 102 可用作光放大介质。图 3 中画出的光传输线路 102 由各光传输线路 102-1 至 102-a+1 构成，而图 4A 中画出的光传输线路 102 由各光传输线路 102-L1、102-L2 和 102-L3 构成。

光中继站 104（图 3 中分别以光中继器 104-1 至 104a 表示，而图 4A 中以 104-A 和 104-B 表示）连接在光通信系统的各光传输线路 102 之间。多个光中继站 104 按需要置于构成光传输线路 102 的各个个别光传输线路之间。每个光中继站 104 包括泵浦光源（如图 4A 中光中继站 104-B 的泵浦光源 105-B），向光传输线路 102 提供泵浦光，用于分布光放大。此外，每个光中继站 104 按需要，通常都有集中的光放大部分和/或光分/插部分。集中光放大部分例如是把 WDM 光信号放大至预定输出光电平的光路。光分/插部分例如是分/插的光路，向/从 WDM 光信号中插入/分出预定信道的光信号。而且，泵浦光源（如图 4A 中的泵浦光源 105-B）也置于光接收站 103 内。

光传输线路 102 是一种光纤，对于各中继器之间的每一段光纤，或一

中继站与一终端站之间的每一段光纤，其中部区的特征值大于中部区以外的区的特征值，这里特征值是非线性折射率  $n_2$  除以有效截面  $A_{eff}$ 。更具体说，如图 4A 所示，光传输线路 102 包括具有预定特征值的第一光传输线路 102-L1、与第一光传输线路 102-L1 连接且特征值大于第一光传输线路 102-L1 特征值的第二光传输线路 102-L2、和与第二光传输线路 102-L2 连接且特征值小于第二光传输线路 102-L2 特征值的第三光传输线路 102-L3。第一光传输线路 102-L1 与置于 WDM 光信号传输方向上游一侧的光中继站 104-A 连接（有时，例如在图 3 中，与光发送站 101 连接）。第三光传输线路 102-L3 与置于 WDM 光信号传输方向下游一侧的光中继站 104-B 连接（有时，例如在图 3 中，与光接收站 103 连接）。

上述光通信系统中，光信号在光传输线路 102 中被泵浦光源提供的泵浦光 Raman 放大，使光传输线路 102 的传输损耗得到补偿。该种泵浦光例如可以由光中继站 104（如图 4A 中的泵浦光源 105-B）内的泵浦光源提供，和/或由光接收站 103 内的泵浦光源提供。

Raman 放大的特性能够从下面的方程式 1 计算。

$$\begin{aligned} \frac{dP_f(z, \nu)}{dz} = & -\alpha(\nu)P_f(z, \nu) + \gamma(\nu)P_b(z, \nu) \\ & + \int_{\xi > \nu} \left\{ \frac{gr}{A_{eff}}(\nu - \xi)[P_f(z, \xi) + P_b(z, \xi)]P_f(z, \nu) \right. \\ & + 2h\nu \frac{gr}{A_{eff}}(\nu - \xi)[P_f(z, \xi) + P_b(z, \xi)] \times \left( 1 + \frac{1}{e^{h(\xi - \nu)/kT} - 1} \right) d\xi \\ & - \int_{\xi < \nu} \left\{ \frac{gr}{A_{eff}}(\nu - \xi)[P_f(z, \xi) + P_b(z, \xi)]P_f(z, \nu) \right. \\ & + 2h\nu \frac{gr}{A_{eff}}(\nu - \xi)[P_f(z, \xi) + P_b(z, \xi)] \times \left( 1 + \frac{1}{e^{h(\xi - \nu)/kT} - 1} \right) d\xi \end{aligned}$$

这里，当取  $z$  轴与光传输线路 102 的传输方向平行时， $P_f(z, \nu)$  是在距离  $z$  处、频率为  $\nu$  的向前的光功率（沿光传输线路向前传播的所有光）， $P_b(z, \nu)$  是在距离  $z$  处、频率为  $\nu$  的向后的光功率（沿光传输线路向后传播的所有光）， $\alpha(\nu)$  是频率  $\nu$  上的衰减量， $\gamma(\nu)$  是频率  $\nu$  上的 Rayleigh 散射系数， $gr(\Delta\nu)gr(\xi - \nu)$  是频率  $\xi$  与  $\nu$  之间的 Raman 增益系数， $A_{eff}$  是光传输线路 102 的有效截面， $h$  是 Planck 常数， $k$  是 Boltzmann 系数，而  $T$  是光传输线路 102 的温度。

关于方程式 1, 请参考论文 “Pump interactions in a 100-nm Bandwidth Raman amplifier” ( H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarjaona: IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, No. 5, p530-p532 ).

按方程式 1 适当设定泵浦光的光功率, 则如图 4B 所示, 在光发送站 101 与光中继站 104-1 之间、在各光中继站 104 之间 ( 如, 光中继站 104-1 和 104-2 之间, 和光中继站 104-a-1 与 104-a 之间 )、和在光中继站 104-a 与光接收站 103 之间, 接收端的输入电平和发送端的输出电平可以做到基本上彼此相等。

另外, 不按方程式 1, 而通过在发送端检测输出电平, 把检测值通知接收端, 并在接收端检测输入电平, 同时控制泵浦光的功率, 也可以做到接收端的输入电平和发送端的输出电平基本上彼此相等。

注意, 图 4B 中的水平轴表示距离而垂直轴表示光信号的功率。

非线性相移  $\Phi_{NL}$  由下面的方程式 2 给出。

$$\Phi_{NL} = k \int_0^L \frac{n_2(z)}{A_{eff}(z)} P(z) dz \quad \dots(\text{方程式 2})$$

这里,  $n_2(z)$  是关于  $z$  轴方向的非线性折射率,  $A_{eff}$  是关于  $z$  轴方向的有效截面,  $P(z)$  是关于  $z$  轴方向的光功率,  $k$  表示  $k=1/\lambda$ , 而  $\lambda$  是信号波长。

用方程式 2, 通过使具有大光功率的区的特征值变小, 例如靠近送出光信号的发送端的区和靠近提供泵浦光的接收端的区, 能够防止非线性相移。此外, 在小功率的区, 例如沿传输方向靠近光传输线路 102 中部的区, 即使特征值增加, 非线性相移也不会增加得太多。

因此, 上述光传输线路 102 能防止非线性相移, 因为光传输线路 102-L2 的特征值已做成大于其两端的光传输线路 102-L1 和 102-L3 的特征值。

此外, 从光传输线路 102 的波长色散观点看, 当例如第一光传输线路 102-L1 和第三光传输线路 102-L3 有正的波长色散 (+D), 而第二传输线路 102-L2 有负的波长色散 (-D) 时, 累积的波长色散 (ps/nm) 与距离 (km) 的相互关系如图 4C 所示。更具体说, 光通信系统的累积波长色散可以画成波长色散曲线, 其中, 随着距离在 0 与 L1 之间增加, 波

长色散也增加, 随着距离在  $L_1$  与  $L_1+L_2$  之间增加, 波长色散却减小, 而随着距离在  $L_1+L_2$  与  $L_1+L_2+L_3$  之间增加, 波长色散再度增加。因此, 光传输线路 102 也能补偿波长色散。

还有, 与分为两段结构的 DMF 比较, 能够减小光传输线路中累积波长色散的偏差量, 还能使累积波长色散对距离的平均变小, 因而能减小因非线性光学效应产生的波形恶化。

附带指出, 第一光传输线路 102- $L_1$  和第三光传输线路 102- $L_3$  具有负的波长色散 ( $-D$ ), 而第二光传输线路 102- $L_2$  具有正的波长色散 ( $+D$ ), 这对光传输线路 102 的波长色散也是合适的。

这里假定, 第一光传输线路 102- $L_1$  的波长色散系数、波长色散斜率、和长度, 分别是  $D_1$ 、 $S_1$ 、和  $L_1$ , 第二光传输线路 102- $L_2$  的波长色散系数、波长色散斜率、和长度, 分别是  $D_2$ 、 $S_2$ 、和  $L_2$ , 而第三光传输线路 102- $L_3$  的波长色散系数、波长色散斜率、和长度, 分别是  $D_3$ 、 $S_3$ 、和  $L_3$ , 那么, 当把光传输线路构造成满足下面方程式的关系时, 波长色散斜率同时得到补偿, 于是对相应的信号波长, 能够实现均匀的传输特性。

$$D_1/S_1 = D_2/S_2 = D_3/S_3, D_1 \cdot L_1 + D_2 \cdot L_2 + D_3 \cdot L_3 = 0 \quad \dots (\text{方程式 } 3)$$

注意, 图 4C 中的水平轴表示距离而垂直轴表示累积波长色散。

因此, 图 3 和图 4A、4B、及 4C 所示光通信系统, 与常规的光通信系统比较, 能够补偿传输损耗和波长色散, 还能够防止非线性相移, 极大地改善光 SNR。这样就有可能比常规光通信系统把传输距离增加得更长。

下面说明为证实上述效应而作的模拟。

图 5A、5B、5C、和 5D 是曲线图, 对光传输线路的每种结构, 画出光功率与传输距离之间相互关系。

模拟是在带有 DMF 的光通信系统中进行的, 该 DMF 是结构改变了的 DMF, 用作光放大介质和光传输线路, 并与一光中继站连接。通过后向泵浦把泵浦光送至 DMF, 并在光中继站中设有 6 dB 噪声值的掺饵光纤放大器。



模拟是对三种类型的 DMF 结构进行的。第一种情形（类型 1）的 DMF 包括具有+D 的第一光纤和具有-D 的第二光纤，并且在本情形中，泵浦光被送至第二光纤。第二种情形（类型 2）的 DMF，包括特征值  $n_2/A_{eff}$  小于第二光纤且具有正波长色散的第一光纤、具有负波长色散的第二光纤、和特征值  $n_2/A_{eff}$  小于第二光纤的第三光纤，并且在本情形中，泵浦光被送至第三光纤。顺便指出，在本模拟中，第一光纤与第三光纤用相同特性的光纤，且它们的长度彼此相等。第三种情形（类型 3）的 DMF 包括具有-D 的第二光纤和具有+D 的第一光纤，并且在本情形中，泵浦光被送至具有+D 的第一光纤。

第二种情形（类型 2）是按照本发明的光通信系统。

第一至第三光纤的特性参数示于表 1。所用特性参数例子的数值，从制作观点看都是易于实现的，当然也可以用其他数值。表 1 中的特性参数是在 1550 nm 上的数值。

表 1

第一光纤和第二光纤的特性参数（L1+L3:L2=2:1）

光纤	长度 L (km)	波长色散 D (ps/nm/km)	损耗 $\alpha$ (dB)	有效截面 $A_{eff}(\mu m^2)$	Raman 增益系数 $gr(m/W)$	非线性折 射率 $n_2$ ( $W^{-1}$ )	Rayleigh 散 射系数 $\gamma (m^{-1})$
第一	L1+L3=68.7	+20	0.174	110	$0.56 \times 10^{-13}$	$2.9 \times 10^{-20}$	$5.8 \times 10^{-8}$
第二	L2=31.3	-43.9	0.274	20	$0.56 \times 10^{-13}$	$4.0 \times 10^{-20}$	$25 \times 10^{-8}$
	100.0						

已经指出，例如在图 3，DMF 的总长度在所有情形（类型 1、类型 2、和类型 3）中例如都是 100 km。按照表 1 中的特性参数，100 km 光纤的总损耗是 20.5 dB。在第一种至第三种（类型 1、类型 2、和类型 3）的每种情形中，如图 5A 所示，调整第一光纤和第二光纤的长度，使 WDM 信号通过该 DMF 传输后（即传输 100 km 之后），累积波长色散在 1550nm 上变为零。WDM 光信号中，在 C 波段的 1529nm 至 1569nm 的 100GHz 间隔内，复用了 44 种波的波长。泵浦光的激励波长，按照（方程式 1），设定在能使 WDM 光信号被 Raman 放大的波长上，而泵浦光功率的设



定, 要使各信道的光功率在该 DMF 输出端的偏差在  $\pm 0.2$  dB 之内。

注意, 图 5A 中的水平轴表示距离而垂直轴表示累积波长色散。图 5C 表示, 当进行 Raman 放大, 使光传输线路的输入信号功率与光传输线路的输出信号功率变成彼此相等时, 光传输线路内信号光功率 (各信道的平均值) 的状态。图 5C 的情形表示传输距离为 100 km, 而图 5D 的情形表示传输距离为 50 km。

各种结果画在图 6 至图 11 上。

图 6 是曲线图, 表示当进行 Raman 放大, 使光传输线路的输入信号功率 (各信道的平均值) 与该光传输线路的输出信号功率变成彼此相等时, 该光传输线路内信号光功率的状态。

图 7 是曲线图, 表明泵浦光功率与 Raman 开/关增益的相互关系。

图 8 是曲线图, 表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系。

图 9 是曲线图, 表明相移与 Raman 开/关增益的相互关系。

图 10A 和 10B 是曲线图, 表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系。

图 11 是曲线图, 表明光 SNR 与泵浦光功率的相互关系和相移与 Raman 开/关增益的相互关系。

这里图 7 至图 10A 和 10B, 是当传输距离为 100 km 时的结果。

注意, 图 6 中的水平轴表示以 km 为单位的距离, 而垂直轴表示光传输线路 102 中的光功率, 以 dBm 为单位。图 7 中, 下面的水平轴表示以 dB 为单位的 Raman 开/关增益, 而垂直轴表示以 dBm 为单位的泵浦光功率。图 8 中, 下面的水平轴表示以 dB 为单位的 Raman 开/关增益, 而垂直轴表示以 dB 为单位的光 SNR。图 9 中, 下面的水平轴表示以 dB 为单位的 Raman 开/关增益, 而垂直轴表示相移。图 10A 和 10B 中, 下面各水平轴表示以 dB 为单位的 Raman 开/关增益, 而各垂直轴表示以 dB 为单位的光 SNR。在图 7 至图 10A 和 10B 中, 上面各水平轴表示相对增益。这里, 相对增益定义为 Raman 开/关增益 (dB) 除以总传输损耗 (dB), 而在本模拟中, 总传输损耗是 20.5dB。图 11 中的水平轴表示以 dBm 为单位的泵浦光功率, 而垂直轴表示以 dB 为单位的光 SNR。

在每个图中，第一种情形（类型 1）的结果，以●或□表示，第二种情形（类型 2）的结果，以□或□表示，第三种情形的结果，以▲或△表示。光 SNR 由下面的方程式 4 计算。

$$\text{Optical SNR} = (\text{Optical SNR}_{\text{DRA}}^{-1} + \text{Optical SNR}_{\text{EDFA}}^{-1})^{-1} \quad \dots \text{ (方程式 4)}$$

这里  $\text{Optical SNR}_{\text{DRA}}$  是因 Raman 放大产生的光 SNR，而  $\text{Optical SNR}_{\text{EDFA}}$  是由于掺饵光纤放大器产生的光 SNR。

Raman 开/关增益是当提供泵浦光（开）时接收端上的输入电平与不提供泵浦光（关）时接收端上的输入电平的比值。

图 6 是曲线图，它把图 5C 中各曲线汇总在一个曲线图中。从图 6 可以清楚看出，当传输时，光电平在传输距离上降低的程度是第二种情形（类型 2）最小。在 0 km 至 50 km 的距离中，各种情形的特性基本上彼此相同，而在约 50 km 至 100 km 的距离中，各种情形的特性彼此有很大程度的不同。因此很清楚，从泵浦光送进的接收端开始，直至约 50 km，Raman 放大是显著起作用的。

从图 7 可以清楚看到，为获得相同 Raman 开/关增益所需的泵浦光功率，按第一种情形（类型 1）、第二种情形（类型 2）、和第三种情形（类型 3）的顺序增加。换句话说，在第一种情形中，Raman 开/关增益能够以最小泵浦光功率获得，所以第一种情形是最有效的。这是因为预先把非线性有效截面小且 Raman 增益系数大的-D 光纤分配在最靠近泵浦光入射端的区内（就是说，泵浦光功率足够大的区）。注意，图 7 中 Raman 开/关增益为 20.5dB 的情形画在图 6。更具体说，为了使接收端的输入电平几乎等于发送端的输出电平，泵浦光功率在各种情形中是彼此不同的。

同时，当 Raman 开/关增益相同时，从图 8 可清楚看出，光 SNR 越来越恶化的顺序是：第二种情形（类型 2）、第三种情形（类型 3）、和第一种情形（类型 1）。

使用光放大的传输系统，其光 SNR 是决定信号质量的基本要素。图 8 中，实线表示由信号光功率  $P_s$  与噪声光功率  $P_n$  之比  $P_s/P_n$  定义（这是普遍使用的光 SNR 定义）的光 SNR。这里噪声光功率  $P_n$  是伴随 Raman

放大的自发 Raman 散射光功率  $P_r$  与被掺饵光纤放大器 (EDFA) 放大的自发辐射 (ASE) 功率  $P_e$  之和:  $P_m = P_r + P_e$ 。此外, 在使用 Raman 放大的传输系统中, 因二次 Rayleigh 散射导致的串扰使信号质量恶化。因此, 在本研究中, 还研究二次 Rayleigh 散射导致的效应。图 8 中的虚线表示计及二次 Rayleigh 散射的光 SNR。计算时, 二次 Rayleigh 散射光也作为自发 Raman 散射光和 ASE 之外的噪声光。更具体说, 噪声光功率  $P_m$  定义为自发 Raman 散射光功率  $P_r$ 、ASE 功率  $P_e$ 、与二次 Rayleigh 散射光功率  $P_d$  之和:  $P_m = P_r + P_e + P_d$ , 而光 SNR 定义为信号光功率  $P_s$  与噪声光功率  $P_m$  之比  $P_s/P_m$ 。

当 Raman 开/关增益相同时, 从图 8 可清楚看出, 非线性相移越来越严重的顺序是: 第一种情形 (类型 1)、第二种情形 (类型 2)、和第三种情形 (类型 3)。

因此, 权衡了 Raman 开/关增益效率、光 SNR 的改善、和防止非线性相移后, 在补偿传输损耗方面, 第二种情形 (类型 2) 是最可取的。

关于这一点, 可从图 10A 和 10B 及图 11 的曲线图看得更清楚。

图 10A 和 10B 是在调整光纤输入功率, 使在各种情况下, 非线性相移都变成基准值时得到的结果。该基准值是在第一种情形 (类型 1) 中输入电平为 -2 dBm 且不提供泵浦光时出现的非线性相移值。

参见计及 Rayleigh 串扰影响的各种计算结果 (图 10A 中实线), 很明显, 最高 (最可取) 的光 SNR 是在类型 2 的情形中获得。同样明显的是, 在约 0.5 或更大的相对增益范围内 (Raman 开/关增益约为 10 dB 或更大), 类型 2 情形的光 SNR, 高于其他情形 (类型 1 和 3)。

再有, 参见计及 Rayleigh 串扰影响的各种计算结果 (图 10B 中虚线), 很明显, 在类型 2 情形中获得的最高光 SNR, 比其他情形 (类型 1 和类型 3) 的最高光 SNR 都高。所以, 最可取的光 SNR 是在类型 2 情形中获得, 这个结论对计及 Rayleigh 串扰时也成立。同样明显的是, 在约 0.5 至 1 的相对增益范围内 (Raman 开/关增益约为 10 至 20.5 dB), 类型 2 情形的光 SNR, 比其他情形 (类型 1 和 3) 都高。

图 11 是曲线图, 图中用泵浦光功率取代图 10A 和 10B 的水平轴, 还

画出非线性相移曲线. 图 11 的实线表示非线性相移, 而虚线表示光 SNR.

目前, 出于安全的考虑和受泵浦光源的最大输出限制, 泵浦光功率的上限值限于约+27 至+30 dBm. 但是对类型 2, 显然不超过泵浦光功率的上限值就能获得较令人满意的光 SNR.

因此, 在权衡传输损耗的补偿、Raman 开/关增益效率、和防止非虚线相移之后, 第二种情形(类型 2)是最可取的. 此外, 如图 4C 和图 5A 所示, 因为在第二种情形(类型 2)中, 能够减小光传输线路内累积波长色散的偏差量, 所以从色散补偿的观点看, 第二种情形(类型 2)是最佳的. 为确认这一点, 下面进行传输波形模拟.

图 12 是曲线图, 画出每种光传输线路结构的眼图.

图 12 画出的眼图曲线, 是把 40 Gbit/s 的归零(RZ)光信号, 每信号安排 100 GHz 间隔, 以+4 dBm/ch.的输入电平, 输入第一至第三种情形(类型 1、类型 2、和类型 3)各传输线路, 经 600 km 传输(100 km × 6 跨距)后获得的.

从图 12 显而易见, 按照本发明的第二种情形(类型 2), 能获得最令人满意的有最宽眼图张度的波长.

所以, 第二种情形(类型 2)的光传输线路, 对波长色散、传输损耗、和非虚线光效应, 相当均衡地作为一个整体进行补偿, 从而最大地改善光 SNR.

附带指出, 在上述说明中, 是按第二光纤长度(L2)与第一光纤的总长度(L1+L3)的比值  $L2/(L1+L3)$  近似为 0.5 的情形说明的, 但是, 别的比值也是可以的. 下面研究长度的比值.

根据参考的论文、产品目录调查、以及逻辑推理, 能以目前技术制作的光纤, 其特征参数值在表 2 中列出. 表 2 列出的特征参数值是在 1550 nm 波长上的数值.

表 2  
可实现的光纤的特征参数

光纤	有效截面 $A_{eff}(\mu m^2)$	非线性折射率 $n_2(W^{-1})$	$n_2/A_{eff}$ ( $1/m^{-1}$ )	波长色散 $D(ps/nm/km)$	波长色散斜率 ( $ps/nm^2/km$ )
第一	55~120	$2 \times 10^{-20} \sim 3 \times 10^{-20}$	$1.7 \times 10^{-10} \sim 5.5 \times 10^{-10}$	$D1=+8 \sim +21$	0.05~0.07
第二	15~45	$2 \times 10^{-20} \sim 4 \times 10^{-20}$	$4.4 \times 10^{-10} \sim 26.7 \times 10^{-10}$	$D2=-14 \sim -60$	-0.03~0.3

为了使在一段（两站之间）内的累积波长色散为零，对第二光纤长度（ $L2$ ）与第一光纤的总长度（ $L1+L3$ ）的比值  $L2/(L1+L3)$  有如下要求：

$$L2/(L1+L3) = -D1/D2$$

显然，按表 2 中光纤的特征参数，下面的方程式很好地成立。

$$L2/(L1+L3) = -D1/D2 = 0.17 \sim 1.5$$

此外，按照图 5C 等等各个结果，为了以小的泵浦光功率获得补偿传输损耗的 Raman 放大特性，加长第二光纤的长度  $L2$  更为有利，但另一方面，为了防止非线性相移，缩短第二光纤的长度  $L2$  更为有利。因此，从权衡的观点看，第二光纤长度（ $L2$ ）与第一光纤的总长度（ $L1+L3$ ）的比值  $L2/(L1+L3)$  约在 0.5 至 1 是较令人满意的。

为了详细研究这种情况，进行下面的模拟。上面已经指出，当长度比约为 0.5 时，本发明是有效的，所以，下面论述把该长度比增加至 1 时的情形。在该情形中光纤的特性参数在表 3 中列出。

表 3  
第一光纤和第二光纤的特性参数（ $L1+L3:L2=1:1$ ）

光纤	长度 L (km)	波长色散 D (ps/nm/km)	损耗 $\alpha$ (dB)	有效截面 $A_{eff}(\mu m^2)$	Raman 增益系数 $gr(m/W)$	非线性折 射率 $n_2$ ( $W^{-1}$ )	Rayleigh 散射系数 $\gamma(m^{-1})$
第一	$L1+L3=50$	+14	0.178	110	$0.56 \times 10^{-13}$	$2.7 \times 10^{-20}$	$5.8 \times 10^{-3}$
第二	$L2=50$	-14	0.230	40	$0.56 \times 10^{-13}$	$3.3 \times 10^{-20}$	$15 \times 10^{-3}$
	100.0						

模拟结果见附图。

模拟结果画在图 13A 和 13B 上. 图 13A 和 13B 是曲线图, 表明光 SNR 与 Raman 开/关增益的相互关系, 还表明调整光纤的输入功率, 使非线性相移变为基准值时得到的结果. 该基准值是在类型 1 结构中输入电平为 -2 dBm/ch. 且不提供泵浦光时出现的非线性相移值. 参见没有计及 Rayleigh 串扰影响的计算结果 (图 13A 和 13B 中实线), 很明显, 最高 (最可取) 的光 SNR 能在类型 2 的情形中获得. 此外, 在约 0.5 或更大的相对增益范围内 (Raman 开/关增益约为 10 dB 或更大), 类型 2 情形的光 SNR, 比其他情形 (类型 1 和 3) 的光 SNR 都高.

再者, 参见计及 Rayleigh 串扰影响的计算结果 (图 13A 和 13B 中虚线), 很明显, 在类型 2 情形中获得的最大的光 SNR, 比其他情形 (类型 1 和类型 3) 的最大光 SNR 都高. 因此, 最可取的光 SNR 在类型 2 情形中获得, 这个结论对计及 Rayleigh 串扰时也成立. 此外, 在约 0.5~1 的相对增益范围内 (Raman 开/关增益约为 10~20.5 dB), 类型 2 情形的光 SNR, 比其他情形 (类型 1 和 3) 的光 SNR 都高.

上述结果证明, 当光纤长度比  $L_2/(L_1+L_3)$  接近 1 而不是 0.5 时, 本发明也是有效的. 因此可以说, 当长度比  $L_2/(L_1+L_3)$  是 0.5~1 时, 本发明特别有效.

接着, 研究对本发明有效的传输线路长度. 为了获得以较小的泵浦光来补偿传输损耗的 Raman 放大特性, 缩短传输线路的总长度 ( $L_1+L_2+L_3$ ) 是更有利的, 但当缩短传输线路长度时, 在有大非线性系数的第二光纤中会增加信号光功率, 使本发明的作用降低. 为了确认这一点, 用缩短至 50 km 的传输线路长度进行模拟.

图 14A 和 14B 画出当长度比  $L_2/(L_1+L_3)$  约 0.5 且传输线路长度分别为 100 km 和 50 km 时的光 SNR. 图 15A 和 15B 画出当长度比  $L_2/(L_1+L_3)$  约为 1 且传输线路长度分别为 100 km 和 50 km 时的光 SNR. 图 14A 及 14B 和图 15A 及 15B 都是计及二次 Rayleigh 散射影响的结果. 从这些图上易见, 类型 2 和类型 1 两种情形的光 SNR, 比类型 3 的光 SNR 更为可取, 但因类型 1 和类型 2 的最大光 SNR 几乎在同一电平, 故与 100 km 长的传输线路比较, 类型 2 优于其他类型的优势下降了. 因此很显

然，当传输线路的长度在 50 km 或更长而不是不断缩短时，本发明特别有效。但是，当它是 50 km 或更短时，从色散补偿光缆的制作效率的观点看，本发明并未丧失优势。

图 16 是曲线图，图上就类型 2 情形中相对增益与光 SNR 的相互关系，对以上所述结果进行概括。所有曲线表示的结果都计及二次 Rayleigh 散射并固定非线性相移。根据图 16 易见，所有各种情形中，在相对增益为 0.5 至 1 的范围内，都可以获得较令人满意的光 SNR。

下面，详细举出光发送站 101、光中继站 104、和光接收站 103 结构的例子。

首先说明光发送站 101 的结构。

图 17 是示意图，画出光通信系统中光发送站的结构。图 17 中，光发送器（以下简称‘OS’）211-1 至 211-m，每个都产生一光信号，输入光复用器（以下简称‘MUX’）222。光发送器的数目通常等于共同复用为一个 WDM 光信号的波长数。例如，分别在不同的波长上设置 m 个光发送器 OS 211-1 至 OS 211-m，以产生 m 个光信号。该 m 个光信号然后被 MUX 222 复用为一个 WDM 光信号。

OS 211-1 至 OS 211-m 中的每一个，例如包括：半导体激光器，用于在预定波长上产生振荡激光；外调制器，例如 Mach-Zehnder 干涉仪类型的光调制器，用待发送的信息调制该激光，从而产生调制的光信号；以及把光信号放大的半导体光放大器。半导体激光器的振荡波长根据 WDM 光信号的每一信道设定。例如，C 波段的 WDM 光信号被安排在 1530 nm ~ 1570 nm。顺便指出，还有其他波段，如 S<sup>+</sup>波段（1450 nm ~ 1490 nm）、S 波段（1490 nm ~ 1530 nm）、L 波段（1570 nm ~ 1610 nm）、和 L<sup>+</sup>波段（1610 nm ~ 1650 nm）。当然，光发送器不限于本特定实施例，有许多现成的不同类型和配置的光发送器可供使用。

MUX 222 把各 OS 211-1 ~ 211-m 输出光信号的波长复用，从而输出一个 WDM 光信号。

MUX 222 输出的 WDM 光信号，输入光耦合器（以下简称‘CPL’）223，并被分为，例如两个信号。分开的信号之一输入光放大器 240，而另



一个输入光电二极管（以下简称‘PD’）226。

CPL 223 是一种光学部件，用于把入射光分为两个信号，并输出该两个信号。例如，一种微型光耦合器，如半反射镜、光纤型融接光纤光耦合器、光波导型光耦合器等等，都是可以用作 CPL 223 装置的例子。但是，本发明不限于所举的例子。

PD 226 是光电转换器，能根据接收的光功率产生电流。PD 226 的输出送至模数转换器（以下简称‘A/D’）228，把模拟输入转换为数字输出。A/D 228 的输出送至中央处理单元（以下简称‘CPU’）231，如用于计算和处理的微处理器。输入至光放大部分 240 的 WDM 光信号的输入电平，由 PD 226 检测。

光放大部分 240 是集成的光放大电路，包括例如 CPL 241 及 243、掺铒光纤（以下简称‘EDF’）242、激光二极管（以下简称‘LD’）244 及 245、和 LD 驱动电路 246。铒元素是一种稀土元素，其元素符号是 Er，原子序数是 68。镧系各元素的性质彼此类似。

输入光放大部分 240 的 WDM 光信号，被送至 CPL 241。LD 244 输出的激光被送至 CPL 241，又被送至 EDF 242 作为泵浦光。各种半导体激光器，如 Fabry-Perot 谐振型激光器、分布反馈激光器、分布 Bragg 反射激光器等等，都可以用作该 LD。但是，本发明不限于所举例子。

CPL 241 把输入光放大部分 240 的 WDM 光信号和 LD 244 输出的激光复用，然后把复用的信号输入 EDF 242。LD 245 输出的激光还经 CPL 243 输入至 EDF 242 的另一端。

EDF 242 吸收从 LD 244 和 LD 245 输出的激光，激励 EDF 242 内的铒离子，形成粒子数反转。当 WDM 光信号输入形成粒子数反转的 EDF 242 时，该 WDM 光信号在 EDF 242 内引起受激辐射，把 WDM 光信号放大。因此，EDF 242 是在两个方向上被激励的。因为 LD 244 和 245 是用于 EDF 242 的泵浦光源，所以它们的振荡波长被设定在 EDF 242 的激励波长上，例如 1480 nm、980 nm、等等。

在本实施例中，使用掺铒元素的光纤放大器作为放大器，但可以根据光放大部分 240 的放大波段来选择稀土元素。放大其他波段的稀土元素，



例如已知的有钕 (Nd)、镨 (Pr)、铥 (Tm)、等等。因此，本发明不限于使用任何特定的稀土元素。

LD 驱动电路 246 输出控制信号，分别送至 LD 244 和 LD 245。LD 驱动电路 246 例如调节 LD 244 和 245 的元素温度，以稳定激光的振荡波长。此外，LD 驱动电路 246 例如根据 CPU 231 的控制信号，调节 LD 244 和 245 的驱动电路，以控制激光的光功率，从而控制光放大部分 240 的增益。有许多不同方法可以适当地驱动激光二极管，所以本发明不限于这里指出的特定方法。

图 17 的光放大部分 240，具有用一级掺铒光纤放大器把 WDM 光信号放大的结构，但本发明不限于该种结构。例如，光放大部分 240 可以具有两级结构，例如包括放大光的第一光放大器、把第一光放大器输出的光衰减的光衰减部分、和把光衰减器输出的光放大的第二光放大器。在如此构造的光放大部分 240 中，作为波长函数的增益，特别是光放大部分 240 的增益斜率，能够在第一和第二光放大器中调节，而光放大部分 240 的输出电平，能够在光衰减器中调节。作为调节输出电平的光衰减器，用可变衰减器是合适的，它能够衰减输入光并把它输出，同时还能够改变衰减量。光可变衰减器的类型可以是，在输入光和输出光之间加一磁光晶体，在磁光晶体的输出端加一偏振片，然后对磁光晶体施加一磁场，通过改变磁场强度来调节其衰减量。

光放大部分 240 输出的 WDM 光信号，被送至能把两个输入光波长复用的光复用器/消复用器（以下简称‘W-CPL’）224。

同时，一个例如与前述光发送器有相同结构的 OS 229，产生被监控信息（以下简称‘OSC’）调制的光信号。监控信息是诸如维护信息和状态信息的信息，该信息对光通信系统的运行是必不可少的，并且至少包括光发送站 101 输出的 WDM 光信号的输出电平。OSC 被设置在例如比 WDM 光信号最小信道 ch.1（信道 1）的波长更短的一侧。但是，本发明不限于把 OSC 设置在该波长上。例如，可以把 OSC 设置在 WDM 光信号最大信道 ch.m 的较长波长一侧。

OS 229 中产生的 OSC 被送至 W-CPL 224。W-CPL 224 把光放大部分

分 240 输出的 WDM 光信号与 OSC 的波长复用。其波长与 OSC 波长复用的 WDM 光信号，输入 CPL 225，被分为两个信号。分开的信号之一输入 PD 227，而另一个作为光发送站 101 的输出，送至光传输线路 102-1，准备发送至下一级的光中继站 104-1。

PD 227 对输入光进行光电转换，且其输出在 A/D 230 中被转换为数字信号后，送至 CPU 231。PD 227 检测光发送站 101 输出的 WDM 光信号的输出电平。

CPU 231 与 A/D 228 及 230、LD 驱动电路 246、存储器 232、和 OS 229 连接，以便向/从各电路发送/接收信号。根据 A/D 228 的输出和 A/D 230 的输出，CPU 231 控制光放大部分 240，以获得固定的增益，并控制该放大部分以获得固定的输出。CPU 231 根据 A/D 230 的输出，检测光发送站 101 输出的 WDM 光信号输出电平、把输出电平信息通知 OS 229、把该输出电平信息纳入 OSC 中、和把该输出电平信息通知下一级的光中继站 104-1。

存储器 232 是一种存储电路，如半导体存储器。存储器 232 存储控制光放大部分 240 的控制程序，以及各种数据。

顺便指出，例如在 MUX 222 和 CPL 225 之间的某些地方，可以设置光隔离器。例如，可以设置在 EDF 242 和 CPL 241 之间或 EDF 242 和 CPL 243 之间。光隔离器是只让光从一个方向通过的光学部件，它能够例如把 Faraday 旋转器放在两个彼此偏转  $45^\circ$  的偏置片之间构成。在光发送站 101 内，光隔离器能防止各光学部件间连接部分的反射光无休止地传播。特别是，如果反射光返回半导体激光器，则各种相位和振幅的反射光会引起半导体激光器振荡模式的变化并产生噪声。这些有害效应可以用光隔离器防止。

下面说明光中继站 104 的结构。

图 18 是示意图，画出光通信系统中光中继站的结构。在图 18 中，例如沿光传输线路 102-1 发送的 WDM 光信号，经 W-CPL 251 输入 CPL 253。泵浦光源单元 270 输出的泵浦光被送至 W-CPL 251。

泵浦光源单元 270 是一光路，向光传输线路 102-1 提供用于分布 Raman

放大的泵浦光, 该单元包括, 例如, W-CPL 272 和 273、偏振光束分束器(以下简称'PBS') 274 至 276、LD 277 至 282、以及 LD 驱动电路 283。

LD 277 输出的激光和 LD 278 输出的激光, 被送进 PBS 274, 并被偏振化/合成, 成为具有互成直角的线偏振成分的激光。同样, LD 279 输出的激光和 LD 280 输出的激光, 被送进 PBS 275, 并被偏振化/合成, 而 LD 281 输出的激光和 LD 282 输出的激光, 被送进 PBS 276, 并被偏振化/合成。

在 PBS 275 被偏振化/合成的激光, 和在 PBS 276 被偏振化/合成的激光, 输入 W-CPL 273, 并把它们的波长复用。在 W-CPL 273 内波长被复用的激光与在 PD 274 内被偏振化/合成的激光, 输入 W-CPL 272, 并把它们的波长复用。

在 W-CPL 272 内波长被复用的激光, 作为泵浦光经 W-CPL 251 输入光传输线路 102-1, 并把光传输线路 102-1 用作放大介质, 对 WDM 光信号进行 Raman 放大。

这里, 为了把 1529 nm 至 1569 nm 上安排各光信号的 WDM 光信号进行 Raman 放大, 分别列举 LD 277 至 282 各振荡波长的例子, LD 277 的波长设定为 1422.0 nm、LD 278 的波长设定为 1426.0 nm、LD 279 的波长设定为 1433.0 nm、LD 280 的波长设定为 1437.0 nm、LD 281 的波长设定为 1459.5 nm、LD 282 的波长设定为 1463.5 nm。当考虑到用一种波长的激光进行 Raman 放大时增益是波长的函数, 那么, 通过把 LD 277 至 282 的振荡波长设定在六种波长上, 用包含六种波长的泵浦光进行 Raman 放大, 作为波长函数的增益就能够在 1529 nm 至 1569 nm 上形成基本上直线的形状。当然, 这些波长仅是举例的, 而本发明不限于任何特定的波长。

LD 驱动电路 283 输出控制信号, 分别送至 LD 277 至 282。LD 驱动电路 283 调节 LD 277 至 282 的元素温度, 以稳定激光的振荡波长。此外, LD 驱动电路 283 还根据 CPU 261 的控制信号, 调节 LD 277 至 282 的驱动电流, 控制激光的光功率, 使 Raman 放大的增益得到控制。

顺便指出, 图 18 中的泵浦光源单元 270 包括, 例如六个 LD 277 至 282,

以便获得必要的泵浦光功率和必要的作为波长函数的增益，但 LD 的数目可以按照需要的泵浦光功率和作为波长函数的增益而确定。

输入 CPL 253 的 WDM 光信号被分为两个信号。分开的信号之一送至 PD 256，而另一个则送至 W-CPL 261。

PD 256 对输入光进行光电转换，且其输出在 A/D 258 中被转换为数字信号后，送至 CPU 261。PD 256 检测输入光中继站的 WDM 光信号的输出电平。

W-CPL 261 把 OSC 波长与 WDM 光信号波长消复用，把 OSC 输出至光接收器（以下简称‘OR’）263，又把 WDM 光信号输出至光信号处理单元 262。为此，W-CPL 261 的截止波长设定在 OSC 波段与 WDM 光信号之间。OR 263 接收并处理 OSC，从 OSC 中取出监控信息，并把监控信息通知 CPU 261。于是，CPU 261 能够获得前一级光发送站 101 的输出电平。

光信号处理单元 262 按照光中继站 104-1 的要求，放大 WDM 光信号，和/或向/从 WDM 光信号插入/分出预定的光信号（信道）。

放大 WDM 光信号时所用结构，与已参照图 17 说明的光放大部分 240 结构相同，因此，这里省略其说明。

分/插时的结构是，例如，为了把要分出的预定光信号分出，设置一个 CPL，用于把 WDM 光信号分为两个，一个光信号拒绝部分，用于拒绝 CPL 输出的 WDM 光信号中预定的光信号，一个 W-CPL，用于把要插入的光信号插入光信号拒绝部分输出的 WDM 光信号中（连同被拒绝的预定光信号）。光信号拒绝部分由滤光器，例如，与预定要分出的光信号数目相等的光纤光栅滤波器（以下简称‘FBG’）级联而成。FBG 的反射波段分别对应于要分出的各信道的波长。

顺便指出，例如可以用声光可调谐滤波器（AOTF）作为光信号拒绝部分。声光可调谐滤波器是一种光学部件，它通过声光效应引起光波导中折射率的改变，并旋转通过该光波导传播的光的偏振态，从而分离/选择波长。

执行两种功能的结构，可以把两种结构级联而得到。

光信号处理单元 262 输出的 WDM 光信号, 被送至 W-CPL 254。

同时, OS 259 产生 OSC, 然后, 把 OSC 送至 W-CPL 254。OSC 至少包括光中继站 104-1 输出的 WDM 光信号的输出电平。

W-CPL 254 把光信号处理单元 262 输出的 WDM 光信号波长, 与 OSC 波长复用。与 OSC 波长复用的 WDM 光信号, 被送至 CPL 255 分为两个信号。分开的信号之一输入 PD 257, 而另一个作为光中继站 104-1 送至下一级光中继站 104-2 的输出, 送至光传输线路 102-2。

PD 257 对输入光进行光电转换, 且其输出在 A/D 260 中被转换为数字信号后, 送至 CPU 261。PD 257 检测光中继站 104-1 输出的 WDM 光信号的输出电平。

CPU 261 连接至 A/D 258 及 260、光信号处理单元 262、存储器 1262、OR 263、OS 259、和泵浦光源单元 270 的 LD 驱动电路 283, 以便向/从这些电路发送/接收信号。CPU 261 根据 OR 263 的 OSC, 获得前一级光发送站 101 的输出电平, 同时参照 A/D 258 的输出, 控制 LD 驱动电路 283, 使光传输线路 102-1 两端的光电平变得彼此相等, 或使光传输线路 102-1 输出端的光电平变成预定值。在前一级, 当输入电平没有达到光发送站 101 的输出电平时, CPU 261 增加 LD 277 至 282 的驱动电流而加强泵浦光, 而在前一级, 当输入电平超过光发送站 101 的输出电平时, CPU 261 降低 LD 277 至 282 的驱动电流而减弱泵浦光。CPU 261 从 A/D 260 的输出, 检测作为本地站的光中继站 104-1 输出的 WDM 光信号的输出电平, 把该输出电平信息通知 OS 259, 并把该输出电平信息纳入 OSC 中, 最后把该输出电平信息通知下一级的光中继站 104-2。

存储器 1262 存储例如控制泵浦光源单元 270 的控制程序, 以及各种数据。

这样, 在图 3 所示的光通信系统中, 光发送站 101 发送的 WDM 光信号, 基本上经过多个光中继站 104 中继, 然后被光接收站 103 接收。这里, 每个光中继站 104 从 OSC 获得前一级光中继站 104 的输出电平, 用它来控制本光中继站 104 的泵浦光源单元 270, 再把本光中继站 104 的输出电平纳入 OSC, 从而把本光中继站的输出电平通知下一级的光中

继站 104.

下面, 说明光接收站 103 的结构.

图 19 是示意图, 画出光通信系统中光接收站的结构.

在图 19 中, 从上一级光中继站 104-a, 经光传输线路 102-a+1 发送至光接收站 103 的 WDM 光信号, 经 W-CPL 291 送至 CPL 292. 从泵浦光源单元 297 输出的泵浦光, 输入 W-CPL 291. 泵浦光源单元 297 是一种光路, 用于向光传输线路 102-a+1 提供泵浦光, 供分布 Raman 放大之用, 该泵浦光源单元 297 例如与泵浦光源单元 270 有相同的结构, 因而这里省略其说明.

输入 CPL 292 的 WDM 光信号被分为两个信号. 分开的信号之一送至 PD 295, 另一个则送至 W-CPL 293.

PD 295 对输入光进行光电转换, 且其输出在 A/D 298 中被转换为数字信号后, 送至 CPU 299. PD 295 检测输入光接收站 103 的 WDM 光信号的输出电平.

W-CPL 293 把 OSC 波长与 WDM 光信号消复用, 把 OSC 送至 OR 296, 并把 WDM 光信号输出至光放大部分 294. 因此, W-CPL 293 的截止波长设定在 OSC 波长与 WDM 光信号波段之间. OR 296 接收并处理 OSC, 从 OSC 中取出监控信息, 并把监控信息通知 CPU 299. 于是, CPU 299 能够获得前一级光发送站 104-a 的输出电平.

光放大部分 294 是一种光路, 用于把 WDM 光信号放大至预定的光电平, 并与参照图 17 所说明的光放大部分 240 有相同结构, 因而这里省略其说明.

从光放大部分 294 输出的 WDM 光信号, 被送至光消复用器 (以下简称 'DEMUX') 301, 对每一波长消复用. DEMUX 301 把 WDM 光信号消复用, 成为与各信道对应的各个光信号. 对应于各信道的消复用的光信号, 分别送至 OR 302-1 至 302-m, 供接收/处理. 每个 OS 302 例如包括: 一光接收部分, 如光电二极管; 一均衡放大器, 使光接收部分的输出均衡; 一定时电路, 从均衡放大器的输出抽取时间标记; 以及一鉴别电路, 按定时电路的时间标记, 从均衡放大器的输出中取出信号.



CPU 299 与 A/D 298、泵浦光源单元 297、光放大部分 294、和存储器 303 连接, 以便向/从这些装置发送/接收信号。CPU 299 根据 A/D 298 的输出, 控制泵浦光源单元 270 中的 LD 驱动电路 283。

存储器 303 存储控制泵浦光源单元 297 的控制程序, 以及各种数据。

作为例子, 干涉滤波器中一种多层介质膜滤波器、排列的波导光栅、等等, 都可以用作 MUX、DEMUX、或 W-CPL。

如图 4A 所示, 每一段连接在光发送站 101、各光中继站 104、以及光接收站 103 之间的光传输线路, 每一段按从发送端至接收端的顺序, 包括: 有小特征值的第一光传输线路 102-L1、有大特征值的第二光传输线路 102-L2、和有小特征值的第三光传输线路 102-L3。作为第一光传输线路 102-L1 和第三光传输线路 102-L3, 例如可以用单模光纤, 而第二光传输线路 102-L2 例如可以用波长色散位移光纤。

在这里, 模场直径因为特征值的不同而各不相同。

图 20A、20B 和 20C 是视图, 画出模变换拼接的若干例子。

图 20A 中, 小特征值的光纤的模场直径 ( $r_1$ ), 比大特征值的光纤的模场直径 ( $r_5$ ) 更大 ( $r_1 > r_5$ )。因此, 当第一光传输线路 102-L1 (第三光传输线路 102-L3) 与第二光传输线路 102-L2 简单地连接时, 由于模场直径不同, 会引起大量连接损耗。

在这里, 如图 20B 所示, 准备好单根或多根, 例如三根连接部分有不同模场直径的光传输线路, 用模场直径逐步改变的光传输线路 102-a 至 102-m 把该光传输线路连接起来。或者, 如图 20C 所示, 把模场直径逐步改变的光传输线路通过熔融连接部分彼此连接起来。

为了补偿光传输线路 102 的波长色散, 最好令第一光传输线路 102-L1 (第三光传输线路 102-L3) 的波长色散斜率  $d_1$  的绝对值, 与第二光传输线路 102-L2 的波长色散斜率  $d_2$  的绝对值几乎彼此相等, 使光传输线路 102 的波长色散斜率几乎变为零。

下面说明双向光通信系统的结构。

图 22A 和 22B 是示意图, 画出双向光通信系统的结构。现在参看图 22A 和 22B, 该双向光通信系统包括: 光发送/接收站 111-A 和 111-B, 用于

产生数量为  $m$  的多种波长的 WDM 光信号，并接收/处理发送的 WDM 光信号；光缆 112-1 至 112-a+1，每一光缆包括在光传送/接收站 111-A 和 111-B 之间传送上游 WDM 光信号且用作光放大介质的光纤（如图 22B 中的 122-L1、122-L2、和 122-L3）；以及传送下游 WDM 光信号且用作光放大介质的光纤（如图 22B 中的 123-L1、123-L2、和 123-L3）。

此外，在双向光通信系统中，在各光缆之间连接有光中继站（如图 22A 中光中继站 114-1 至 114-a）。该多个光中继站 114-1 至 114-a 设置在各光缆 112-1 至 112-a+1 之间。

各光中继站 114-1 至 114-a 通常包括提供泵浦光的泵浦光源，用于分布光放大。例如，如图 22B 所示，光中继站 114-A 至 114-B 沿传输线路彼此相邻。光中继站 114-A 包括泵浦光源单元 270-Aa 和 270-Ab，向光缆提供分布光放大所需泵浦光。同样，光中继站 114-B 包括泵浦光源单元 270-Ba 和 270-Bb，向光缆提供分布光放大所需泵浦光。泵浦光源单元 270 通常也设置在光发送/接收站 111-A 和 111-B 中。

如上所述，各光发送/接收站 111-A 和 111-B，能够用光发送站 101 与光接收站 103 组合而构成。如上所述，各光中继站 114-1 至 114-a，能够用两个光中继站 104 组合而成。

每根光缆在其内部容纳多根捆在一起的缆心光纤，且基本上由缆心光纤、高抗拉材料、和外覆皮构成。缆心光纤是包有保护材料诸如尼龙的光纤。高抗拉材料防止埋设光缆时由拉伸引起光纤的张力，避免光纤内产生持续的张力。按传输特性、绞距的可操作性、和连接的可操作性，研发了各种光缆，其中例如有：尼龙心光纤单元光缆、松套光缆、槽式光缆、和带状槽式光缆。

如图 22B 所示，发送上游 WDM 光信号的光纤 122 包括，有小特征值的第一光纤 122-L1、与第一光纤 122-L1 连接且有大特征值的第二光纤 122-L2、和与第二光纤 122-L2 连接且有小特征值的第三光纤 122-L3。第一光纤 122-L1 与放在 WDM 光信号传输方向上游端的光中继站 114-A 连接，第三光纤 122-L3 与放在 WDM 光信号传输方向下游端的光中继站 114-B 连接。



同时,如图 22B 所示,发送下游 WDM 光信号的光纤 123 包括,有小特征值的第一光纤 123-L1、与第一光纤 123-L1 连接且有大特征值的第二光纤 123-L2、和与第二光纤 123-L2 连接且有小特征值的第三光纤 123-L3。第一光纤 123-L1 与放在 WDM 光信号传输方向上游端的光中继站 114-B 连接,第三光纤 123-L3 与放在 WDM 光信号传输方向下游端的光中继站 114-A 连接。

在上述双向光通信系统中,中部区的特征值大于中部区以外区特征值的光纤 122 和 123,被用来发送 WDM 光信号并把该 WDM 光信号进行 Raman 放大。波长色散、传输损耗、和非线性光学效应,能够相当均衡地作为一个整体进行补偿,从而最大地改善光 SNR。

此外,由于光纤的对称特性,光纤 122-L1 的长度与光纤 123-L3 的长度,光纤 122-L2 的长度与光纤 123-L2 的长度,和光纤 122-L3 的长度与光纤 123-L1 的长度,都能分别作成彼此相等,所以该光缆是易于制作的。

按照本发明的分布光放大设备、光通信站、光通信系统、与光缆,能对波长色散、传输损耗、和非线性光效应,相当均衡地作为一个整体进行补偿,从而也最大地改善光 SNR。

因此,能把传输距离增加得比常规技术的传输距离更长。

按照本发明以上各个实施例,当把非线性折射率除以有效截面的值,设为特征值时,则分布光放大设备包括一种光纤,其中部区的特征值大于中部区以外的区的特征值,还包括向该光纤提供泵浦光的泵浦光源。

还有,按照本发明各个实施例的分布光放大设备,包括一种光纤,该光纤包括有第一特征值的第一光纤、与第一光纤连接且有大于第一光纤特征值的第二特征值的第二光纤、和与第二光纤连接且有小于第二光纤特征值的第三特征值的第三光纤。该特征值是非线性折射率除以有效截面。泵浦光源向该光纤提供泵浦光。

此外,按照本发明各个实施例的一种光通信站,包括:处理装置,用于对光信号进行预定的处理;和与处理装置连接的光纤,且该光纤包括第一光纤、第二光纤和第三光纤,第一光纤有第一特征值,第二光纤与

第一光纤连接且有大于第一光纤特征值的第二特征值，第三光纤与第二光纤连接且有小于第二光纤特征值的第三特征值。该特征值是非线性折射率除以有效截面。该光通信站还包括向该光纤提供泵浦光的泵浦光源。

再有，按照本发明以上各个实施例的一种光通信站，包括用于对光信号执行预定处理的第一站和第二站。该光通信系统还包括连接第一站和第二站的光传输线路。该光传输线路是一种光纤，包括第一光纤、第二光纤和第三光纤，第一光纤有第一特征值，第二光纤与第一光纤连接且有大于第一光纤特征值的第二特征值，第三光纤与第二光纤连接且有小于第二光纤特征值的第三特征值。该特征值是非线性折射率除以有效截面。泵浦光源向该光纤提供泵浦光。

按照本发明各个实施例的一种光缆，包括多根中部区的特征值大于中部区以外区特征值的光纤，这里所说的特征值是非线性折射率除以有效截面。

按照本发明各个实施例，上述分布光放大设备、光通信站、光通信系统、和光缆，都用到有上述特殊结构的光纤，使波长色散、传输损耗、和非线性光学效应能够相当均衡地作为一个整体进行补偿，从而最大地改善光 SNR。因此，能把传输距离增加得比常规技术的传输距离更长。

本文所说几乎彼此相等的各种数值或电平，表示这些数值或电平基本上相等。

本发明各实施例涉及把多根光纤连接在一起的光纤线。例如，在本发明各实施例中，如在图 4A 中，光纤线 102 包括连接在一起的第一、第二、和第三光纤 102-L1、102-L2、和 102-L3。“光纤线”一词，简单地指由多根光纤连接在一起的光纤，因而不限于指光通信系统的“传输”线。

虽然已经举出并说明了几个优选实施例，但本领域熟练人员明白，可以改动这些实施例而不偏离本发明的精神和由权利要求书及其等价表述规定的范围。

## 说明书附图

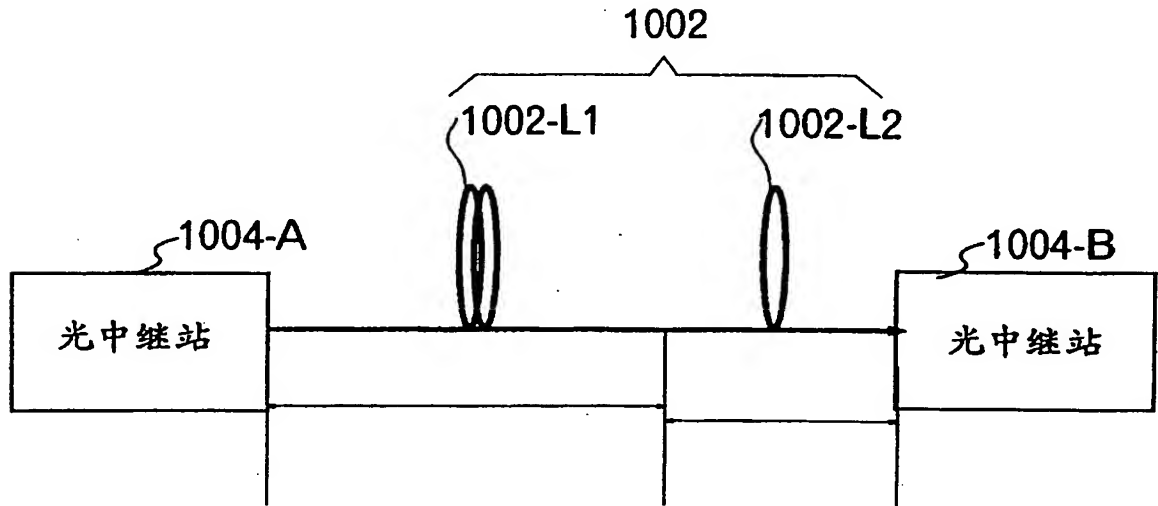
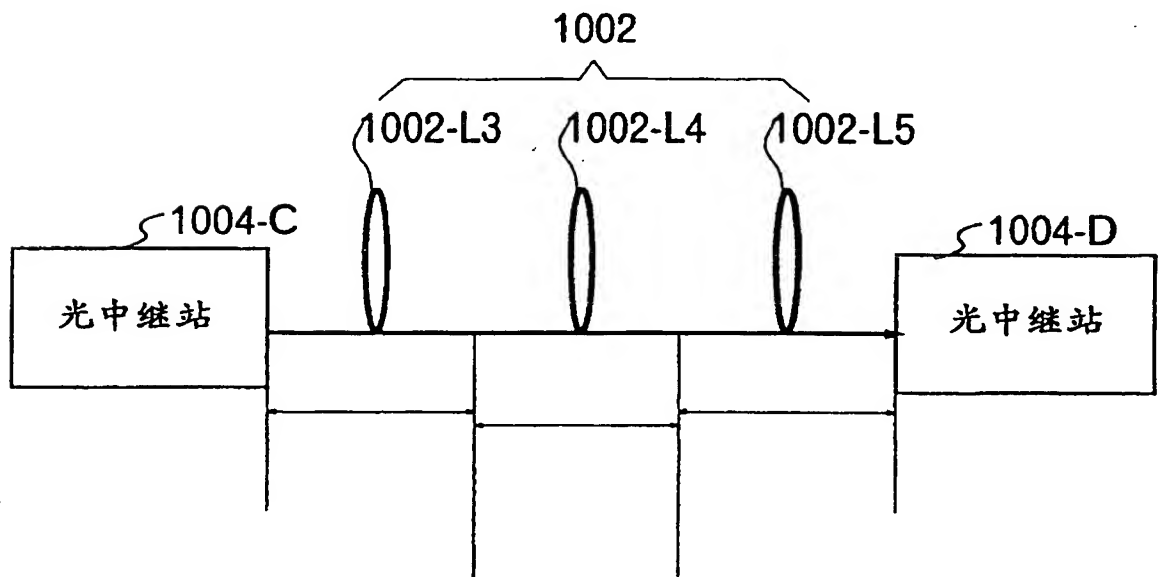
图 1A  
现有技术图 1B  
现有技术

图 2A  
现有技术

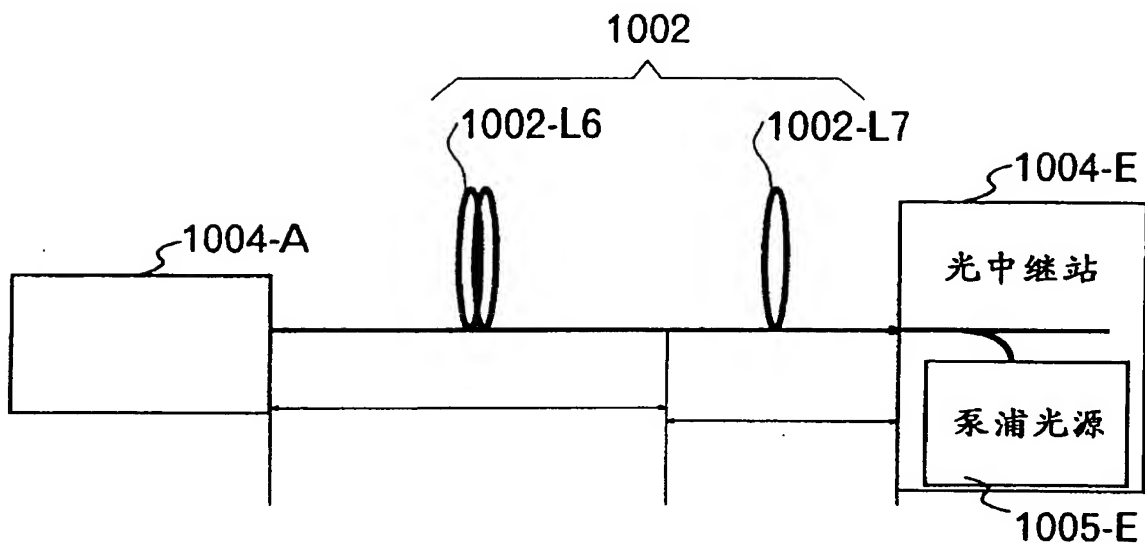
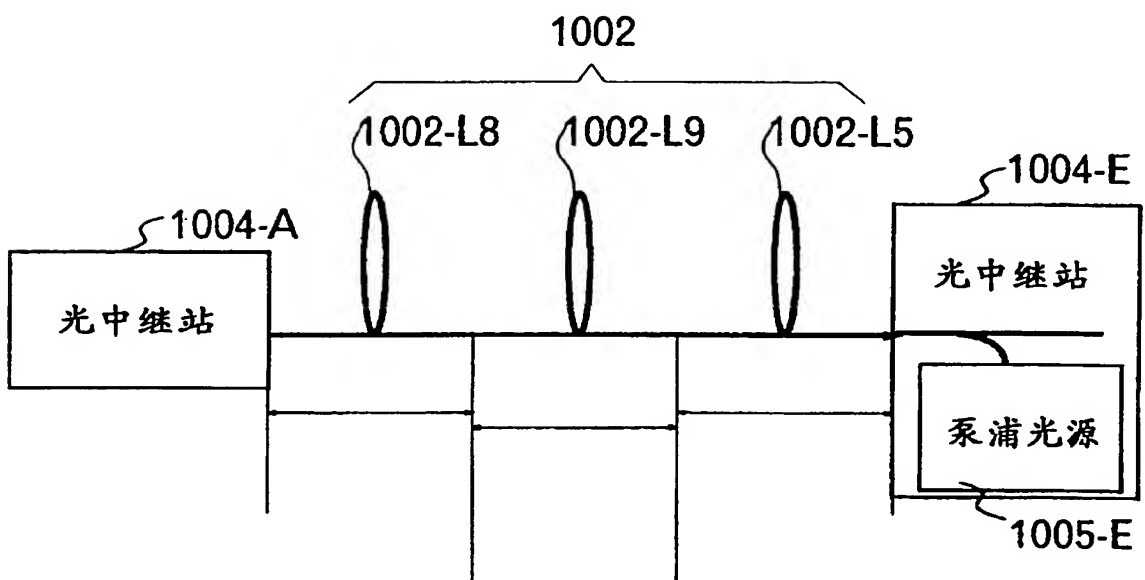


图 2B  
现有技术



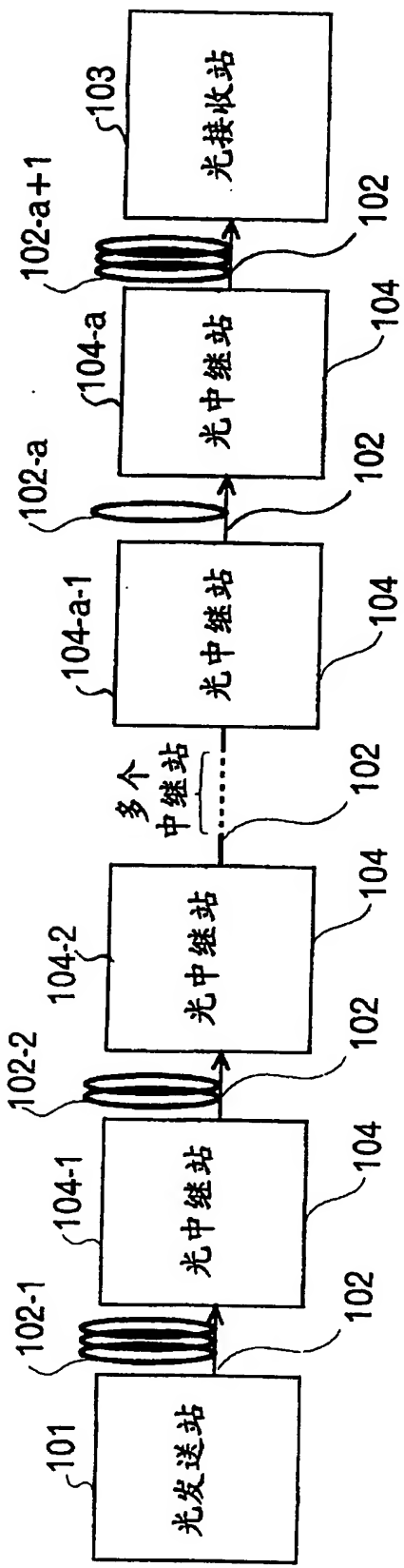


图3

图 4A

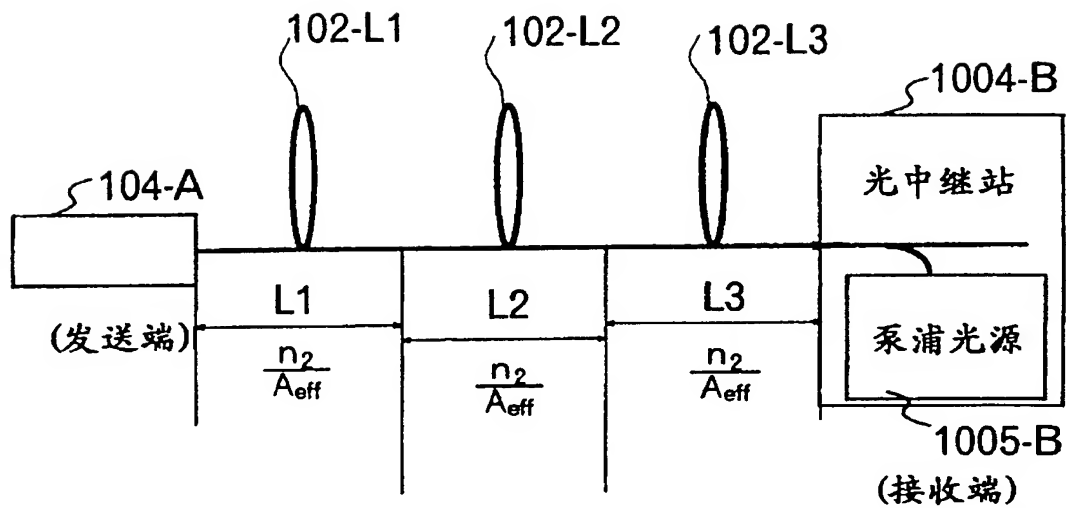


图 4B

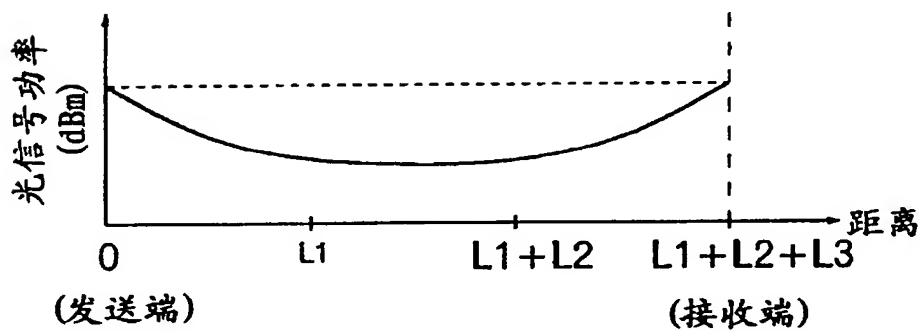
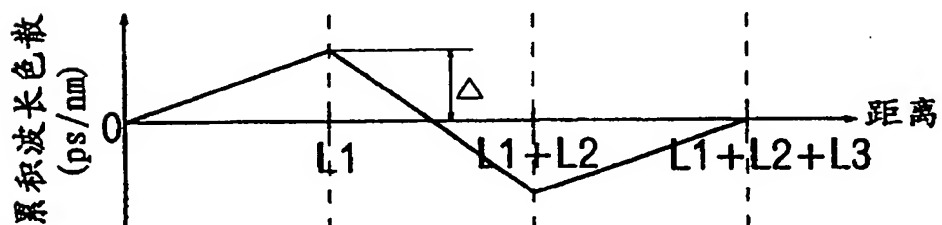
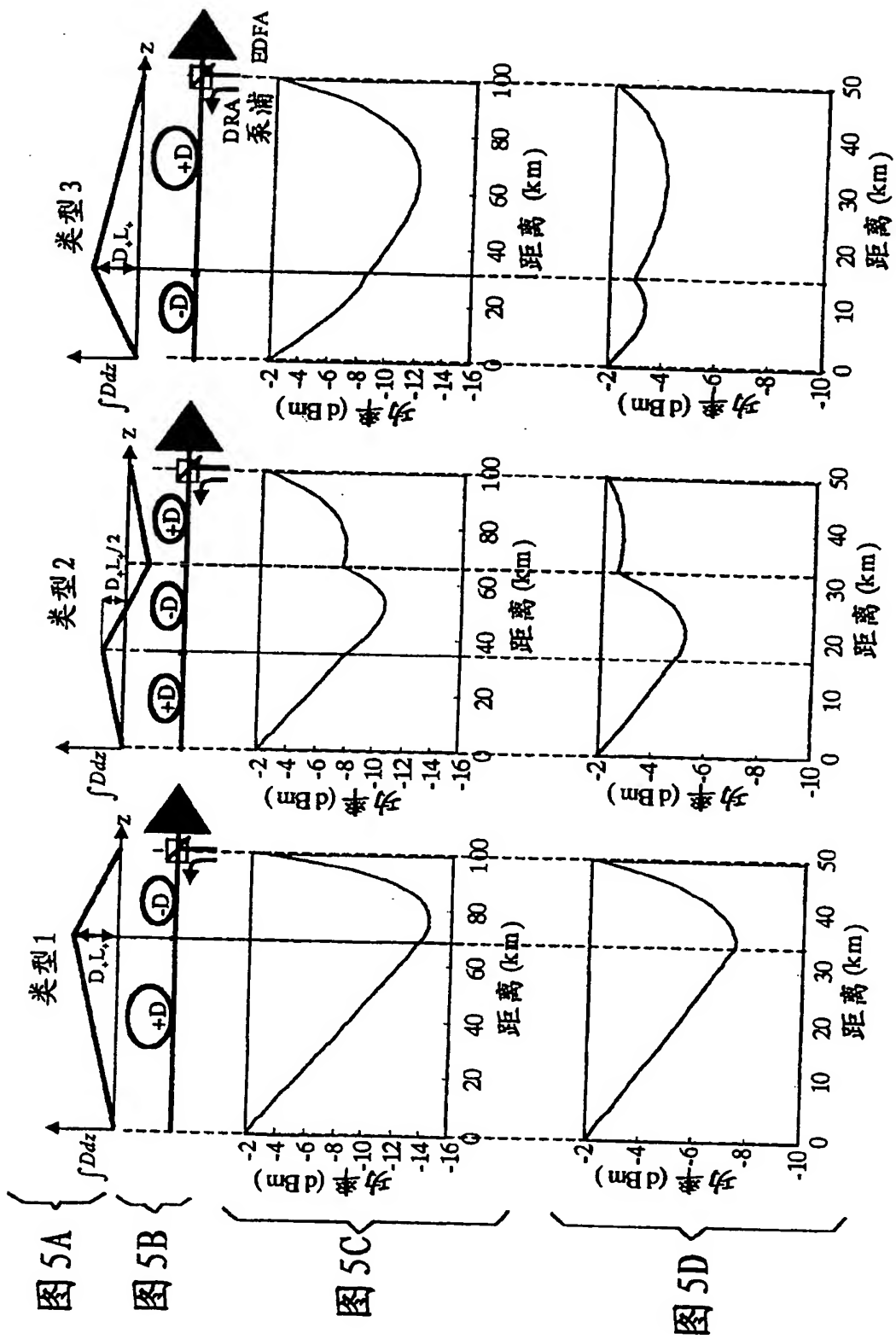


图 4C







01.10.30

图 6

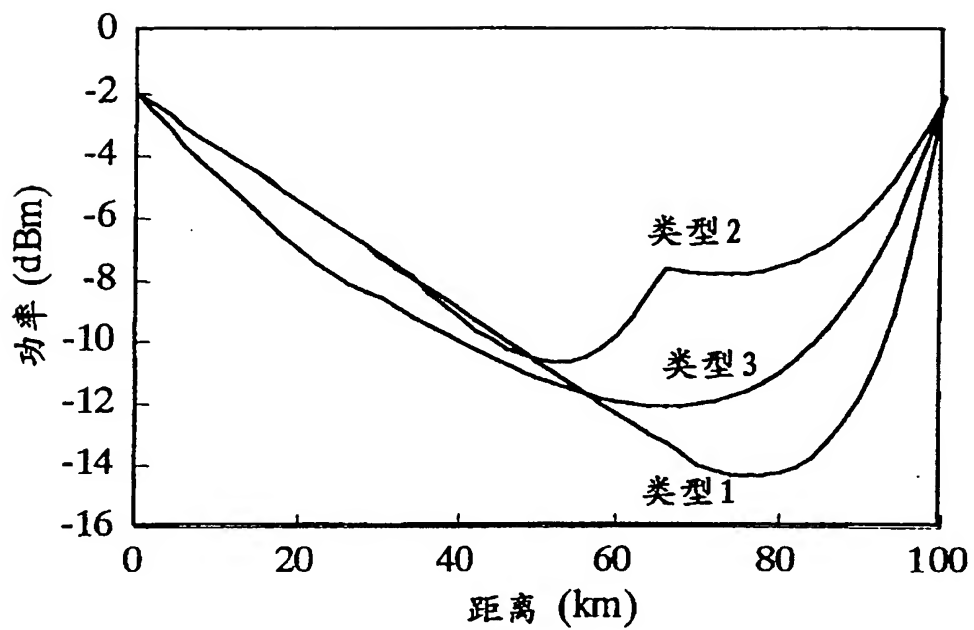
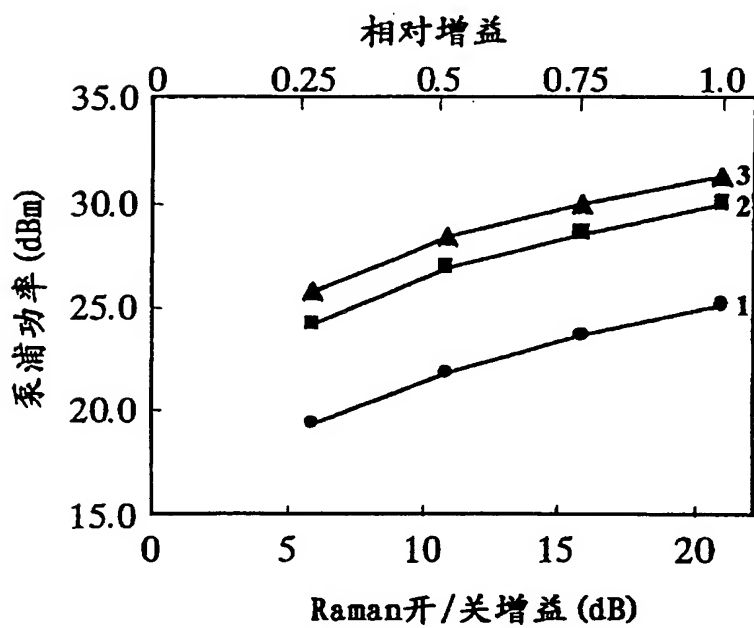


图 7



01:10:30

图 8

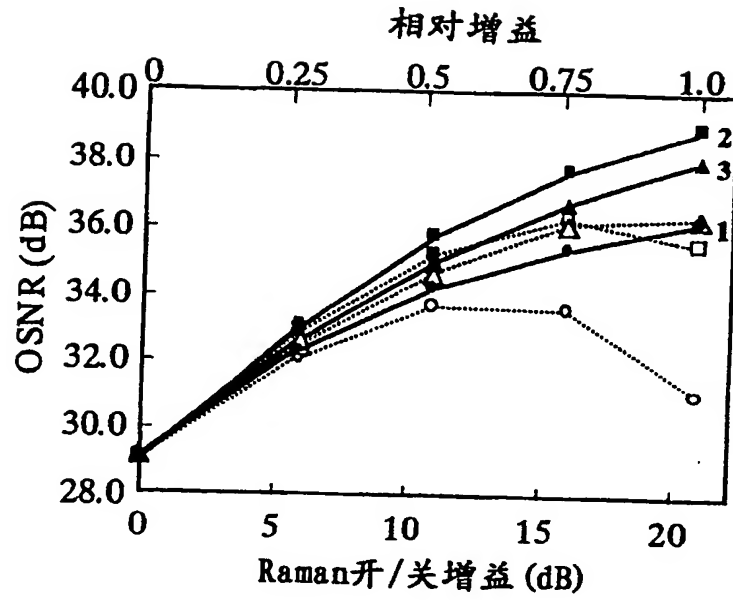
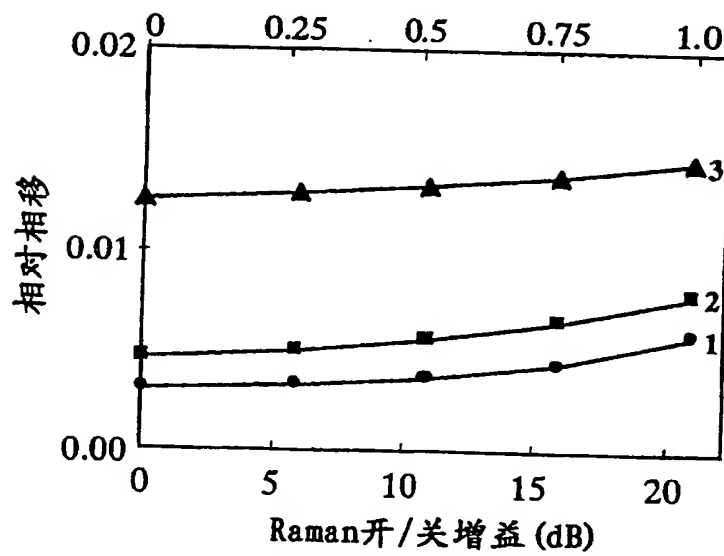


图 9



01.10.30

图10A

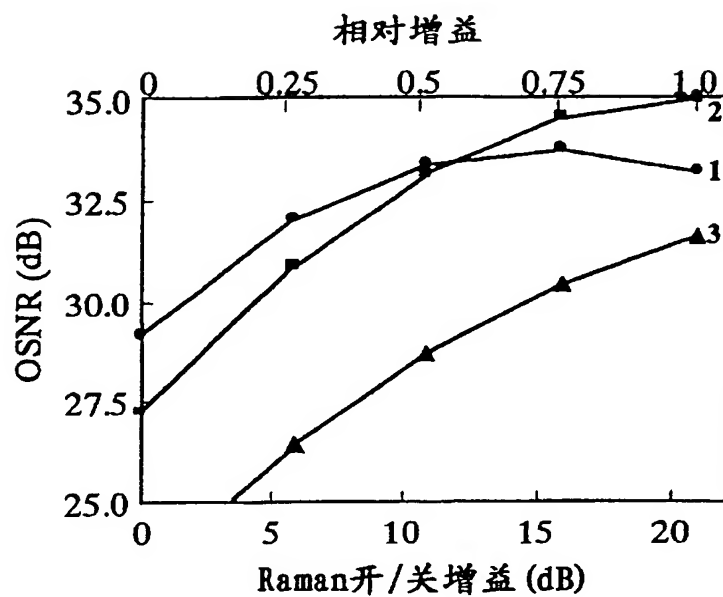
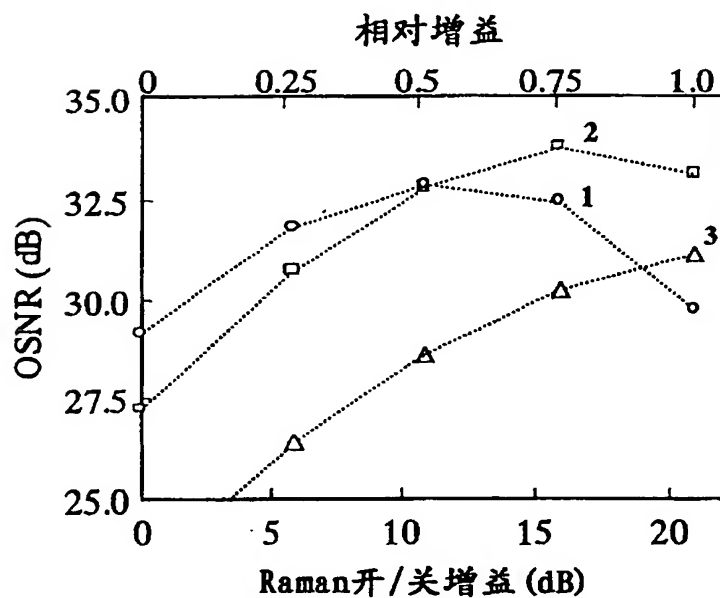
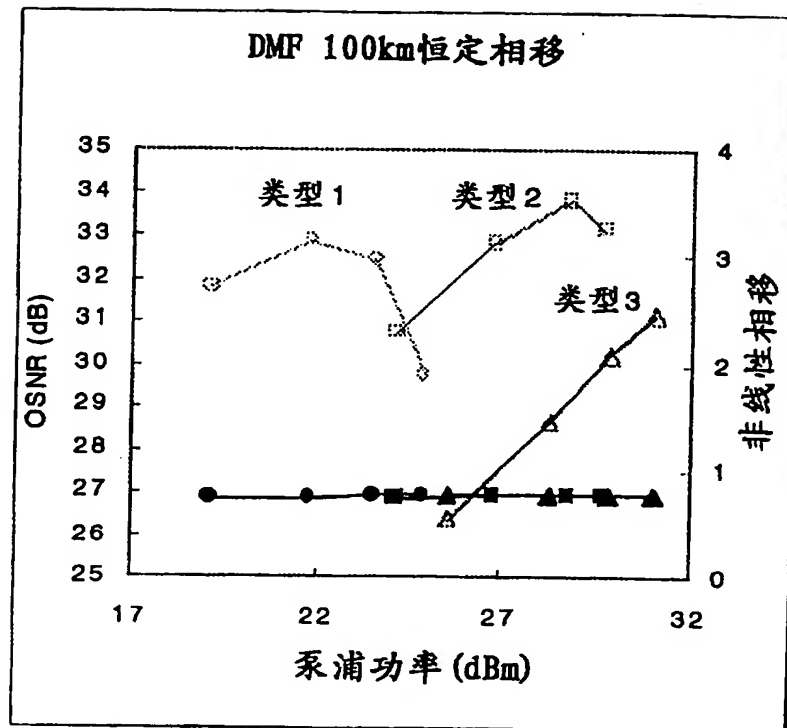


图10B



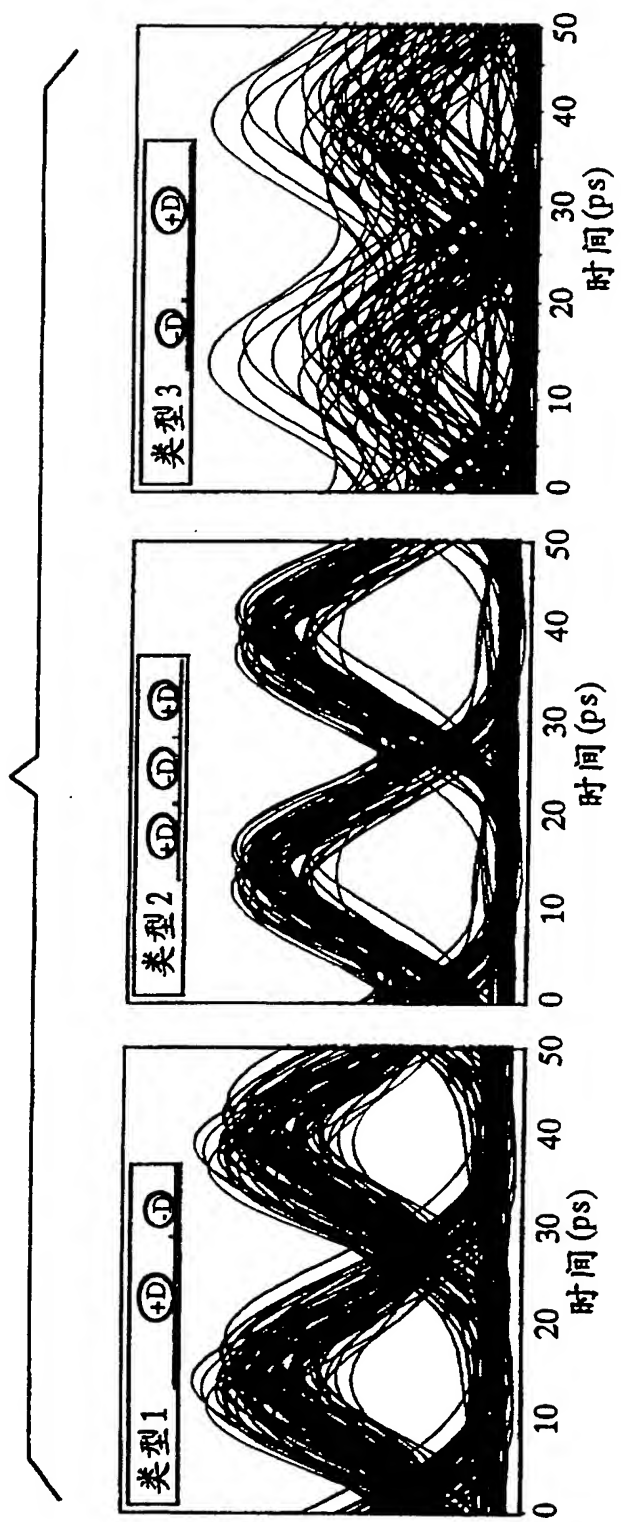
01:10:30

图11



0.10.30

图12



01:10:30

图 13A

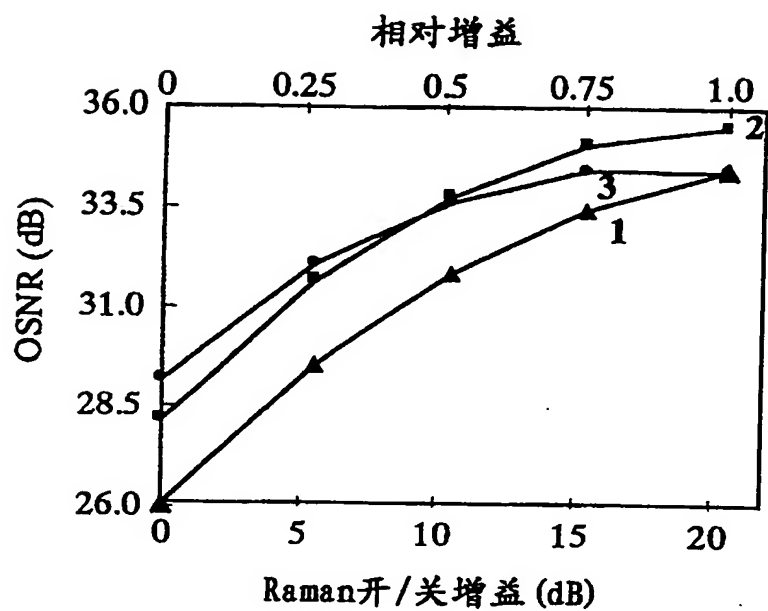
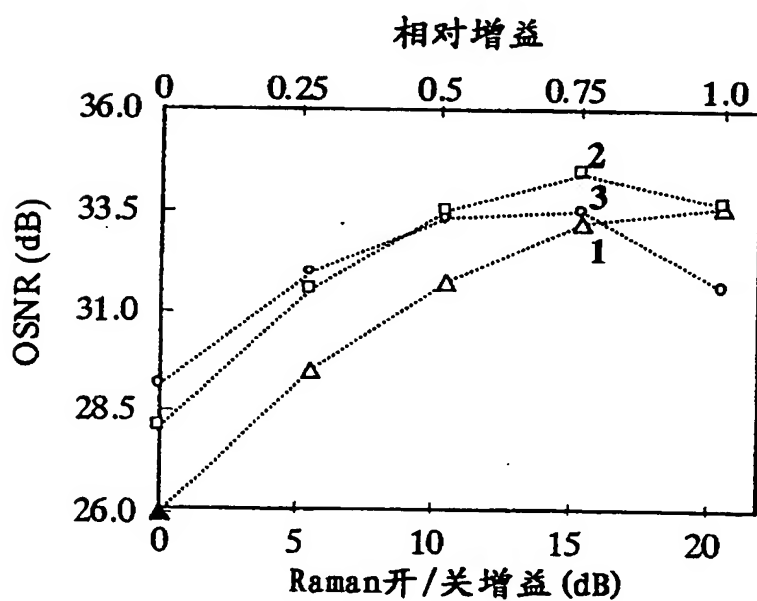


图 13B



01.10.30

图14A

100 km

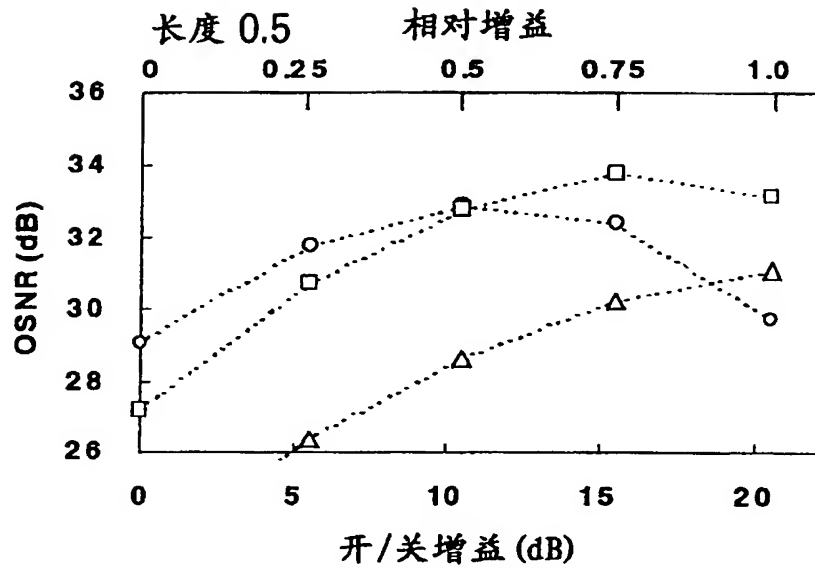
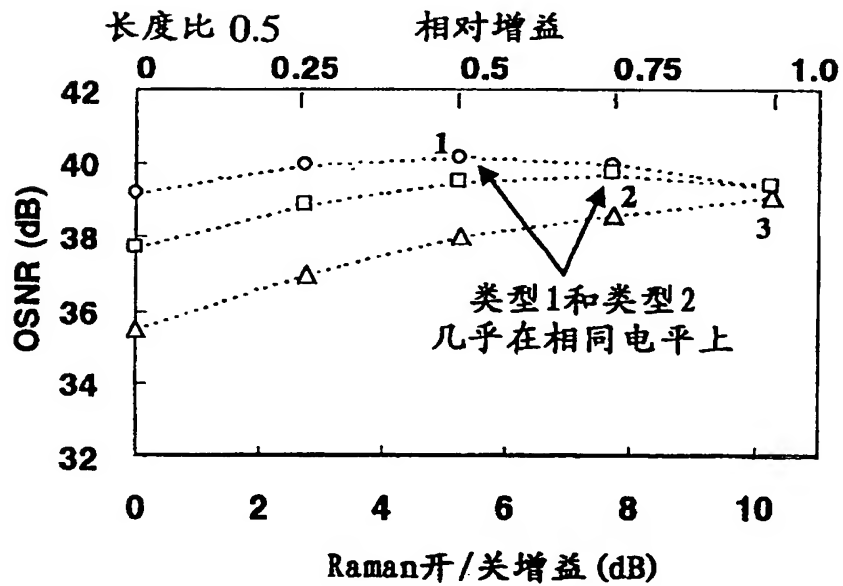


图14B

50 km





01:10:30

图15A

100 km

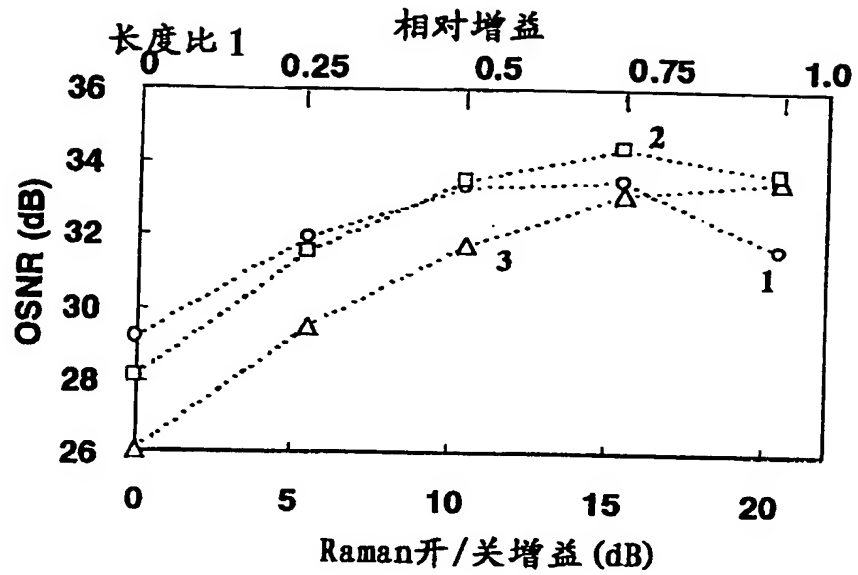
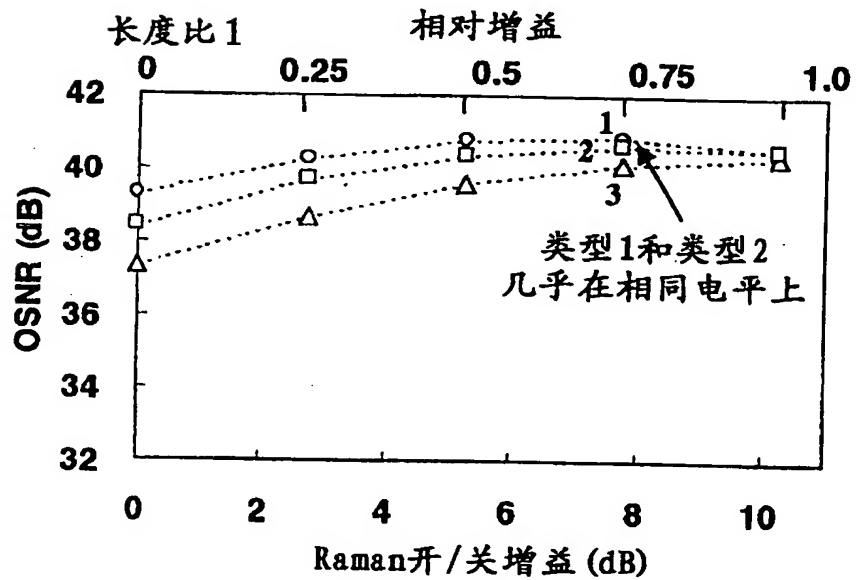


图15B

50 km



01.10.30

图16

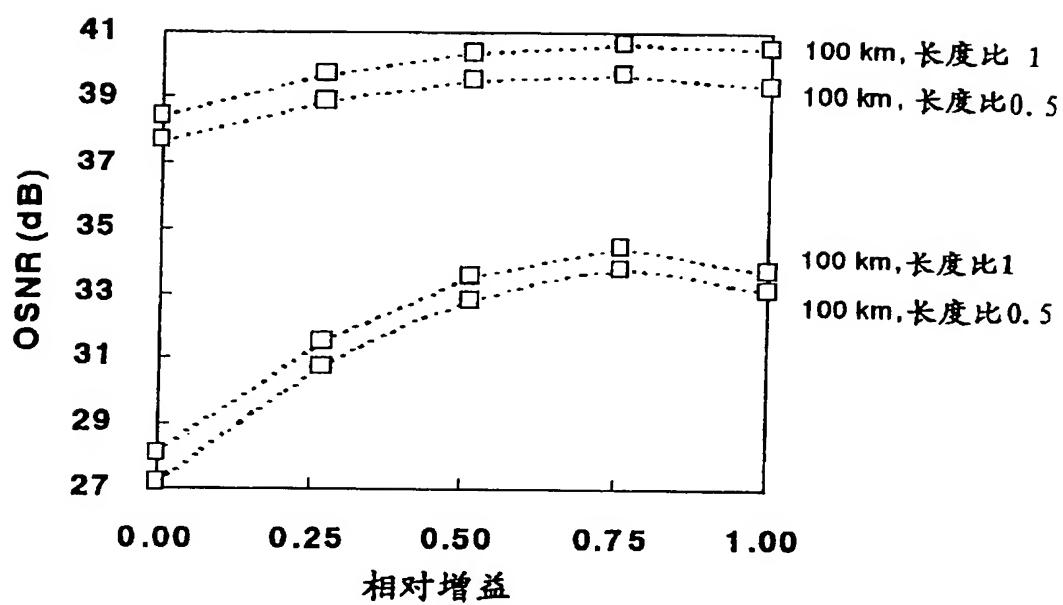
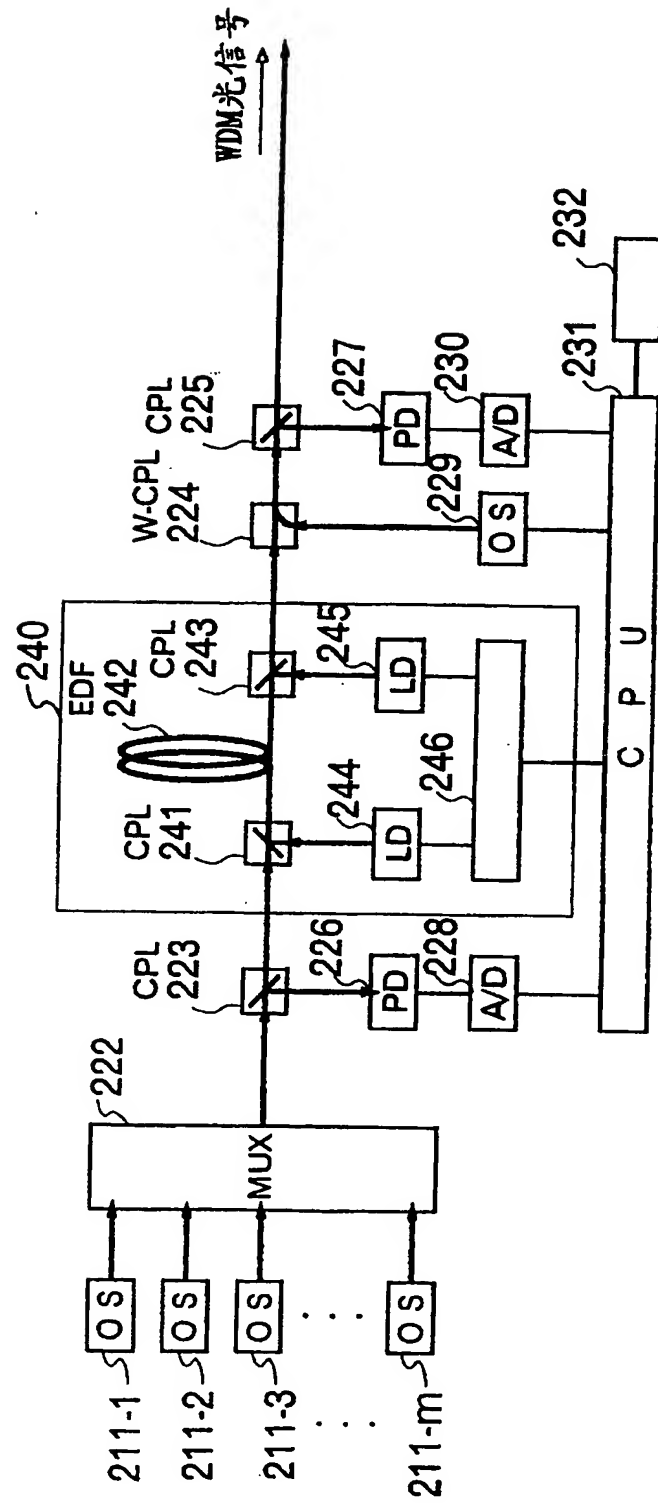


图17



0 0 0 0

图18

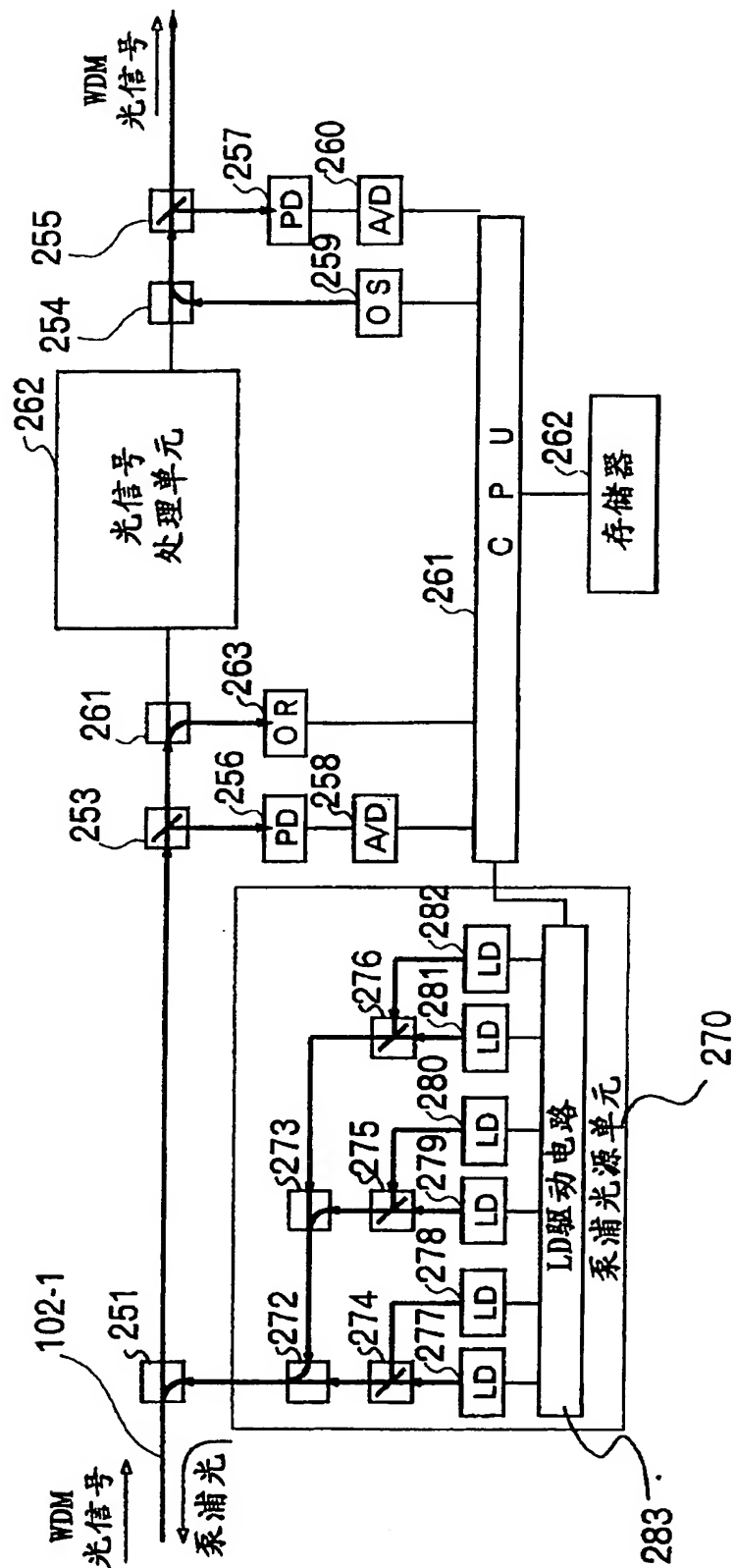


图19

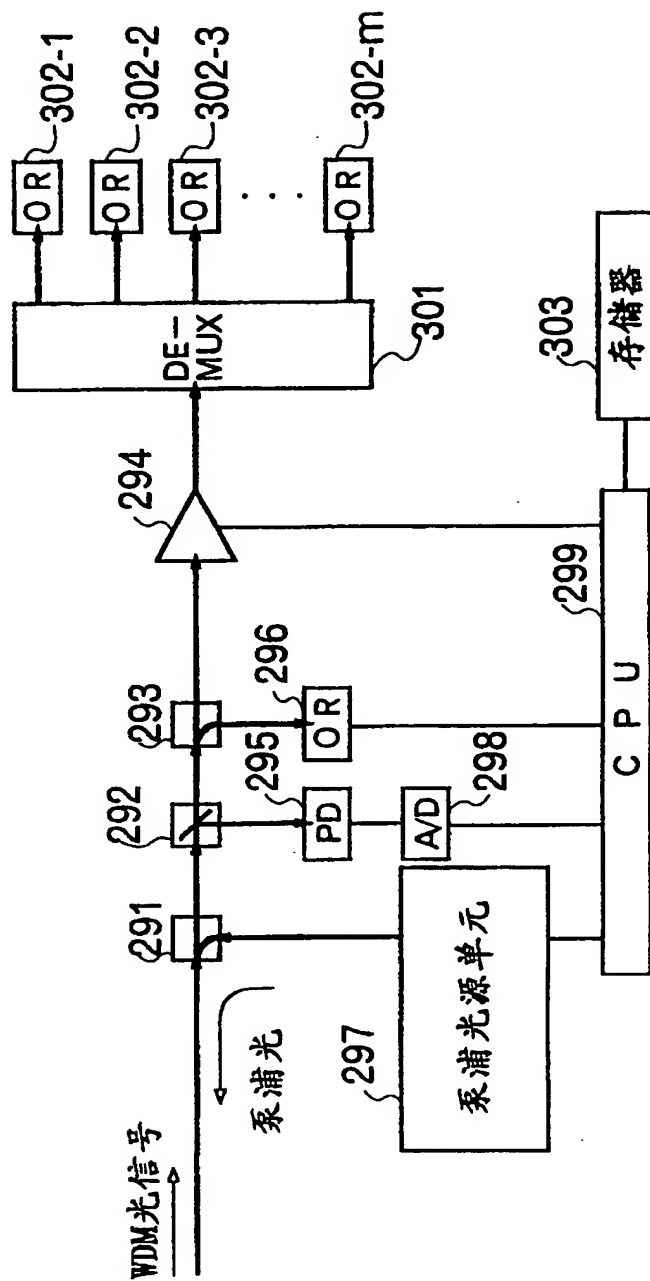


图 20A

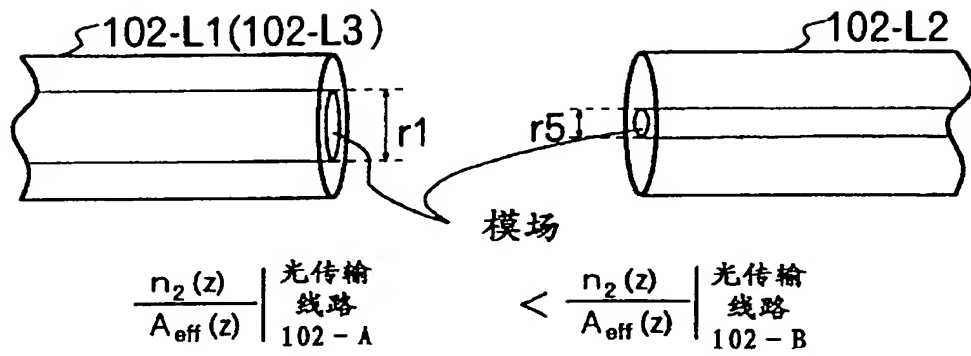


图 20B

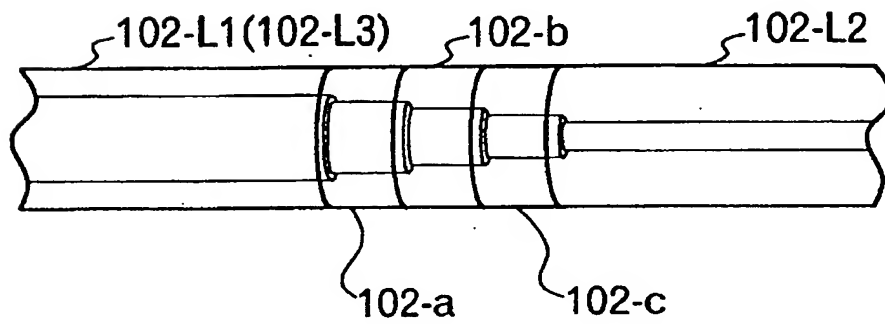


图 20C

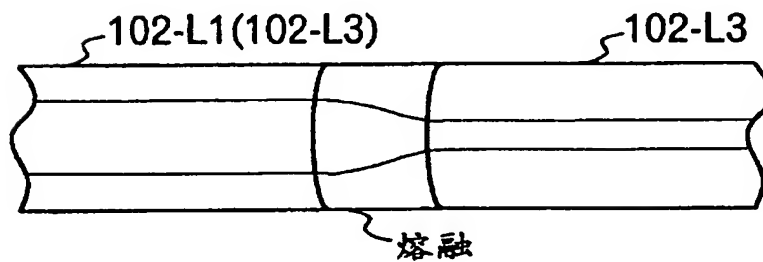
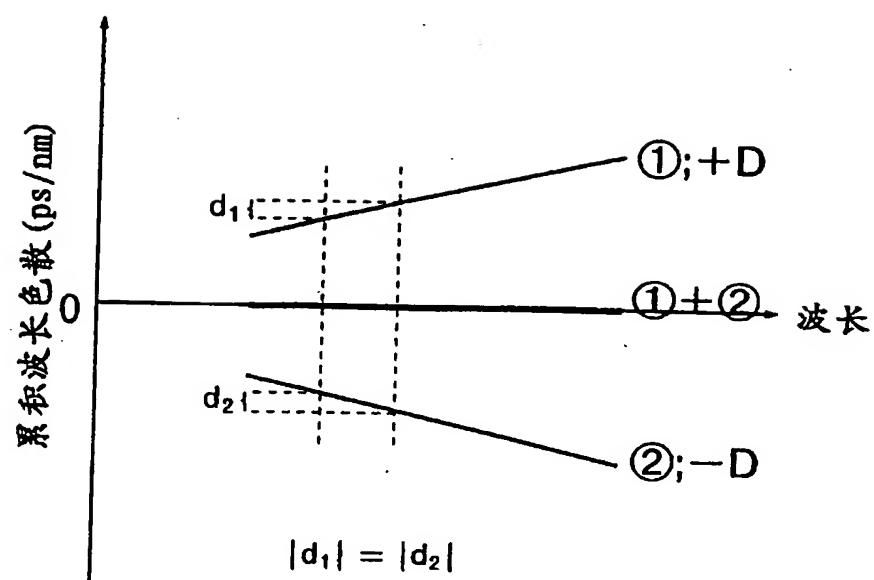


图 21







**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**